

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學(二)科

團隊合作獎

082906

最小能量～探討水晶膠花的特性與應用

學校名稱：臺北市士林區劍潭國民小學

作者：	指導老師：
小六 李珮穎	黃瓊慧
小六 黃聖甯	涂玉芳
小六 陳宥蓉	
小六 陳贊翔	
小五 劉子涵	

關鍵詞：水晶膠、表面張力、抗穿刺強度

摘要

本研究藉由高分子水晶膠造花液的表面張力來沾附銅線形成膜面進行探究，目的在：1. 找出影響**最小能量成膜**的原因；2. 尋找合適的稀釋液；3. 找出最佳的操作方法。

研究中選擇「面積」、「銅線粗細」、「夾角大小」、「支架數量」、「稀釋液」之變動變因來探討，透過觀察「沾取容易度」、「膜面厚度」與「抗穿刺強度」來探究水晶膠的最佳操作方式。

研究結果發現：1. 「縮小線圈面積」、「選用較的銅線」、「增加支架數量」可獲得較厚(至少 **0.0049mm**)且抗穿刺強度較佳(至少 **1.33 級**)的**最小能量**膜面。2. 「乙酸乙酯」是較理想的稀釋液。3. 為達成或克服水晶膠表面張力形成的**最小表面積**。4. 本作品可應用至生活飾品及擺飾精品，並重複**環保**使用。

壹、研究動機

無意中在網路上看到了水晶花的介紹，暑假的自主學習作業中，我便給自己訂了學會製作漂亮水晶花的目標。自己購買水晶膠製作後，希望了解其成膜原因，因此，我上網查了表面張力的資料，與好友一起深入研究。並運用一上「吹泡泡」的經驗、四下「規律的時間」單元中學到的單擺概念，進行水晶膠造花液的研究。

貳、文獻探討

一、水晶膠

水晶膠的成份為合成樹脂與有機溶劑，乾燥後會硬化，形成膜面或塊狀物體。在歷屆科展中未找到針對其進行探討的研究。

二、表面張力

表面張力為液體表面上對每單位長度所呈現的張力，促使液體自動尋找最低位能的狀態，促使液體縮小其表面面積，自然形成**最小的表面積**（李品慧，2009；中興大學物理學系普通物理實驗室，2020；維基百科，2020）。在歷屆科展能找到許多關於表面張力的研究，我們參考前人的研究結果：1. 膜強度與表面張力、膜厚度有關（李彥霆等，2016）；2. 正多面體的皂液成膜形態（周昕諭，2016），並以此為依據，討論發展出我們自己的研究方向。

三、抗穿刺強度

抗穿刺強度是指膜面受銳利物體的作用力時，被戳破的最大阻力情況。我們參考前人檢測蟲癭殼、自製垃圾袋的耐穿刺工具（林品汝等，2015；黃翊瑄等，2018）與檢測肥皂、蠟筆的硬度工具（陳旻琦，2010；黃鐔楷等，2018），綜合改良成適用於本研究對象的水晶膠膜面抗穿刺強度檢測工具。

最小表面積是表面張力需要做功的最小表面能，本研究的核心價值是將此物理應用在生活裝飾及裝置藝術上。

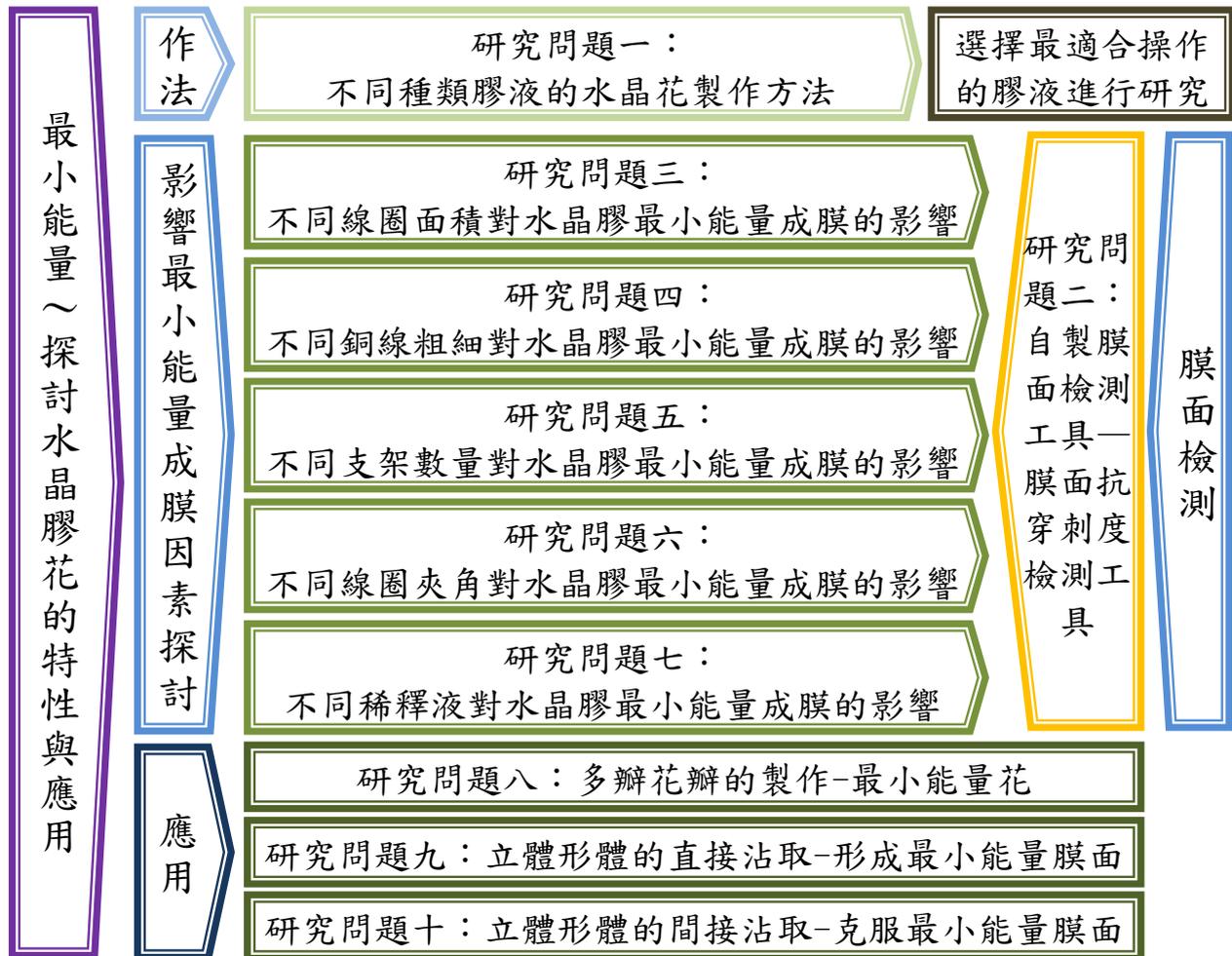
參、研究目的

- 一、探討各種膠液的水晶花製作方式
- 二、自製膜面的抗穿刺強度檢測工具
- 三、研究線圈面積對水晶膠成膜的影響
- 四、研究銅線粗細對水晶膠成膜的影響
- 五、研究支架數量對水晶膠成膜的影響
- 六、研究線圈夾角對水晶膠成膜的影響
- 七、研究不同種類稀釋液對水晶膠成膜的影響
- 八、嘗試多瓣花瓣的製作(2D)
- 九、嘗試立體形體的製作(2.5D、3D)

肆、研究設備及器材

- 一、實驗膠液：水晶膠、指甲油、UV 膠、乙醇、乙酸乙脂、丙酮、異丙醇、專用稀釋液
- 二、盛裝攪拌：PP 塑膠罐、寬口容器、滴管、牙籤、紫外燈、攪拌棒、海綿墊
- 三、線圈製作：銅線、古氏積木、透明膠帶、平口鉗、斜口鉗
- 四、測量工具：微量秤、卡尺、千分尺、尺、自製抗穿刺強度檢測工具

伍、研究概念流程



陸、研究過程、方法與結果

研究問題一：不同種類膠液的水晶花製作方法

- (一) 實驗器材：銅線、指甲油、UV 膠造花液、水晶膠造花液、寬口容器、牙籤、紫外燈、海綿墊、熱風槍

(二) 實驗步驟：

1.分別運用指甲油、UV 膠造花液、水晶膠造花液製作水晶花並比較之。

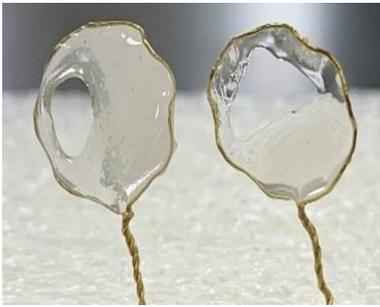
表一 各種造花液的製作過程比較表

	指甲油	UV 膠造花液	水晶膠造花液
1. 塑形	將金屬線圈折成需要的花瓣大小與形狀。		
2. 倒膠與調色	將指甲油倒入寬口容器中以便沾取。	在膠液中加入色液或色粉，調成所需的顏色。	
3. 沾膠	將金屬線圈放入膠液中，沾裹膠液後再慢慢取出，使線圈中形成膜面。		
4. 固化	插在海綿墊上靜置待乾燥。	照射紫外燈使之固化。	插在海綿墊上靜置待乾燥。
5. 上色	以指甲油或壓克力顏料塗在固化後的花瓣膜面背面。若用有色指甲油可不上色。		以指甲油或壓克力顏料塗在固化後的花瓣膜面背面。若使用有色膠液可不上色。

6. 組合	將花瓣依序組合後綁緊，並剪除多餘的金屬線尾即完成。		
			
7.	在完成品上塗佈透明指甲油，使膜面不易破。	在完成品上塗佈 UV 硬膠，使膜面牢固不易脫落。	使用吹風機或熱風槍吹整，使膜面更緊繃。

(三) 實驗結果：

表二 各種造花液的使用心得比較表 (★代表推薦度)

項目	指甲油	UV 膠造花液	水晶膠造花液
價格	10 元/ml★	18 元/g	3.25 元/ml★★
沾取的時 間性	曝露於空氣中太久會變得濃稠難以沾取，可加入去光水或丙酮稀釋來改善。★	曝露在光線中一段時間後，膠開始結塊，變得難以沾取，需重新調製。	曝露於空氣中一段時間，表面會結皮，搖晃後使結皮沉入，就能繼續使用。★★
製作的 便利性	1. 指甲油需先倒出來，在寬口的容器中才好操作。 2. 選用有色指甲油不需調色。★	1. UV 膠需先擠到寬口容器中才好操作。 2. 要先加入調色液攪拌均勻才能使用。	1. 直接操作，不必調色。★ 2. 乾燥後用指甲油上色，也可選用有色的膠液。★★
保存的 方便性	1. 倒出來卻沒用完的指甲油難以再倒回罐內，需另外準備罐子盛裝。★ 2. 若保存不當導致整罐膠液太過濃稠，可加入去光水或丙酮來改善。★	1. 倒出來卻沒用完的膠液無法保存，只能清理掉。 2. 需保存在不透光的黑色罐子中，並放置在陰「暗」處。	1. 直接蓋上蓋子保存。★★★ 2. 若保存不當導致整罐膠液太過濃稠，可加入專用稀釋液來改善。★★
工具 的複 雜性	需要寬口容器與指甲油，工具最少。★★★	需寬口容器、調色液、調色棒與紫外燈，工具最多。	需要熱風槍與指甲油上色，工具不多。★
作品 的受 限性	市售指甲油大約 7.5~30ml 左右，倒入寬口容器後膠液高度變低，不好沾取。★	部件 >1cm ² 以上不易沾取膠液，且容易有破洞。 	部件大小較不受限，但必需小於罐口，大於罐口則無法伸入膠液中沾取。★★
推薦	8★	0★	14★

- 1.不管是指甲油、UV 膠造花液或水晶膠造花液，**在成膜過程中，都會有最小表面張力能量，且會以最小面積呈現出膜的狀態**。因此，我們在嘗試使用三種膠液製作水晶花後，將過程中的使用感想綜合比較如表二。**水晶膠造花液是三者當中較為理想的**，不僅價格最便宜，工具也簡易容易取得，使用與保存上都是最方便的。因此，我們將以水晶膠造花液進行水晶花製作的研究。
- 2.水晶花製作完成後可當擺飾或飾品，膜面若有較強的耐用度（耐重或耐穿刺的程度），則作品較不容易因為配戴而損壞，有較長的使用時間，因此，我們想自製出測試膜面耐受度的工具。**→研究問題二**
- 3.在使用水晶膠造花液製作大型品時，會發現線圈圈圍面積太大而無法讓膠液順利成膜的情形，所以，我們想試試改變銅線粗細或增加支架來看看是否能較順利沾取膠液？**→研究問題三、四、五**
- 4.製作花瓣時，單瓣花片在沾取膠液雖然非常順利，但纏繞銅線卻很費工，而複瓣花片雖較省銅線的消耗，但沾取膠液時卻會發生花瓣間互黏的情形，因此我們想探討銅線線圈間夾角是否對沾取膠液有影響？**→研究問題六**
- 5.水晶膠造花液放置一陣子後，會覺得膠液變得濃稠，我們尋找能稀釋膠液的專用稀釋液，但專用稀釋液非常昂貴（2.1 元/ml），而能稀釋指甲油的去光水與酒精則很便宜。因此，我們想試試可否用酒精（0.18/ml）、去光水（0.4 元/ml）、丙酮（0.14 元/ml）或其他溶劑取代專用稀釋液，以節省水晶花的製作成本？**→研究問題七**

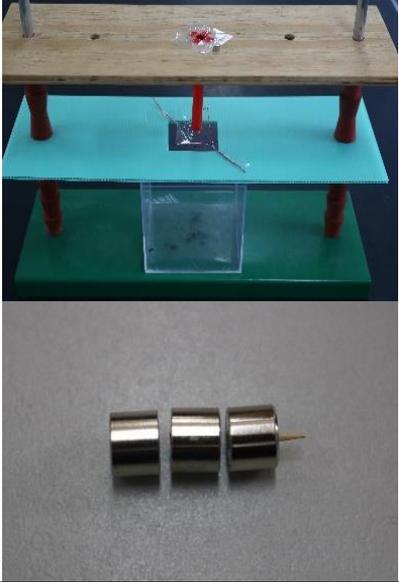
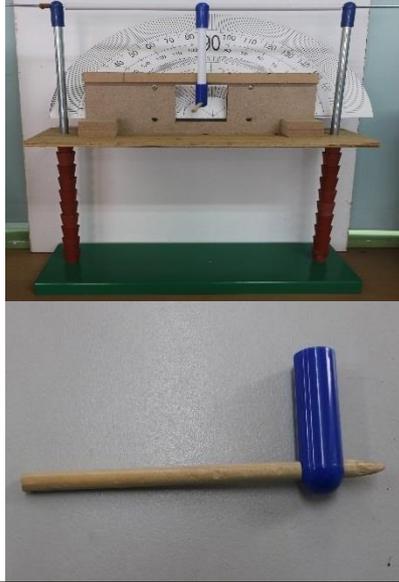
研究問題二：膜面抗穿刺強度測量工具製作

- （一）實驗器材：固定架、塑膠管、木板、竹筷、量角器、長尾夾、瓦楞板、有孔瓶塞
- （二）實驗過程：

- 1.我們花費了許多時間討論與製作抗穿刺強度的檢測工具，如表三所呈現，我們嘗試了三版的錯誤，由最初的重量版，改良到長度版，再改進到角度版，綜合檢討工具不理想的地方，修正再改進。

表三 自製膜面抗穿刺強度工具修正表

	第一版-重量版	第二版-長度版	第三版-角度版
構想	膜面能承受由高空落下的重物之「重量」	膜面能承受由高空落下的擺錘之「長度」	膜面能承受由高空落下的擺錘之「角度」

	(砝碼每個 1g +牙籤)	(5cm、10cm、15cm、20cm)	(45°、90°、135°、180°)
設計理念	膜面水平式固定 固定落下的高度 5cm 砝碼可逐個黏貼加重 吸管為確保掉落方向	膜面垂直式固定 固定擺錘角度為 180° 擺錘可抽換 隨擺錘長度加減瓶塞高度	膜面垂直式固定 固定擺錘長度 15cm 膜面測試板有插槽固定 加裝量角器確認角度
裝置			
修正原因	<ol style="list-style-type: none"> 1. 乾燥後的膜面會因為收縮而造成非平面形狀，導致重物滾落而無法測試。 2. 牙籤的尖端太碎弱，容易因掉落後折斷。 3. 兩個節點的方形線圈只有兩黏貼固定點，易傾斜，測試點易偏差。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 夾放膜面的木板容易因震動而傾斜，導致戳刺的位置不同而有誤差。 2. 原子筆尖太過堅硬銳利，膜面都會在 10cm 的擺錘下被刺破，沒辦法有測試出差異性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 量角器不固定，操作使用不易對準。 2. 強度分級太少，部分膜面無法分出差異。

(三) 實驗結果：(第四版-長度角度版)

1. 最終確定的第四版膜面抗穿刺度檢測工具的製作方法如下圖 1~9。



圖 1 切割塑膠管

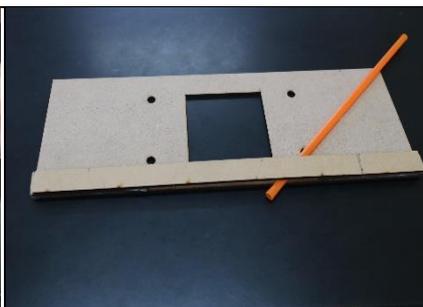


圖 2 中空木板上方黏木條

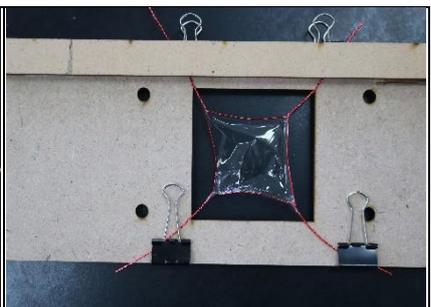
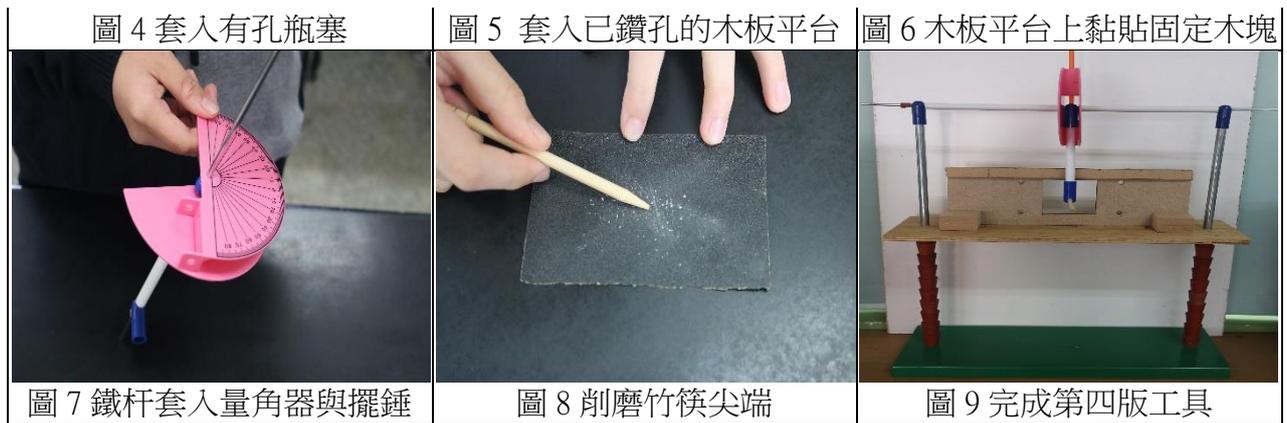


圖 3 夾住水晶膠膜面





2.為了增加抗穿刺強度分級的級數，我們使用 15cm、20cm 兩種擺錘，加上四種角度，形成 8 級的分級，詳述如下表。

表四 抗穿刺強度的分級

級數	1 級	2 級	3 級	4 級	5 級	6 級	7 級	8 級
擺錘	長度 15cm	長度 15cm	長度 15cm	長度 15cm	長度 20cm	長度 20cm	長度 20cm	長度 20cm
狀態	角度 45°	角度 90°	角度 135°	角度 180°	角度 45°	角度 90°	角度 135°	角度 180°

研究問題三：不同線圈面積對水晶膠最小能量成膜的影響

(一) 實驗器材：銅線、古氏積木、透明膠帶、平口鉗、斜口鉗、水晶膠、海綿墊、千分尺、自製抗穿刺強度工具

(二) 實驗步驟：

- 1.剪取 14cm 銅線 4 段，兩兩銅線尾端互相纏繞成一股，約 6cm 長（如圖 10、11）。
- 2.將兩股各取一端尾端（圖 10 中的 A 和 C），預留 1cm 後，剩餘的部分互相纏繞成一股（如圖 12、13）。
- 3.將兩股打開框住古氏積木後，將另兩尾端（圖 10 中的 B 和 D）剩餘的部分互相纏繞成一股（如圖 14、15）。
- 4.用平口鉗將纏繞的四股分別扭緊，使框住積木部分的銅線能平直（如圖 16）。
- 5.用斜口鉗將分別纏繞的四股銅線剪成等高，約 6cm 長（如圖 17）。
- 6.銅線取下後，將四股折成與四邊形垂直的狀態，完成 6 個邊長 1cm 面積 1cm^2 的方形線圈（如圖 18、19）。
- 7.重複步驟 1~6 的方法，剪取不同長度的銅線，製作不同面積的方形線圈各 6 個（如圖 20、21）。邊長 2cm 面積 4cm^2 —銅線長度 15cm、邊長 3cm 面積 9cm^2 —銅線長度 16cm、邊長 4cm 面積 16cm^2 —銅線長度 18cm、邊長 5cm 面積 25cm^2 —銅線長度 19cm。

8.線圈沾取膠液成膜後，插在海綿墊上等待乾燥固化（如圖 22）。

9.使用千分尺與自製檢測工具，測量膜面厚度與抗穿刺強度並比較之（如圖 23、24）。

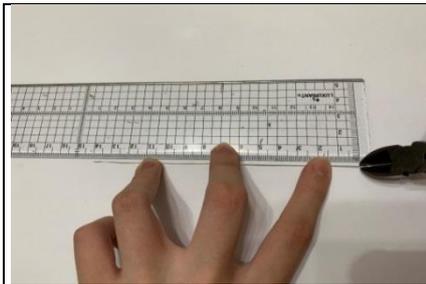


圖 10 用斜口鉗剪取銅線

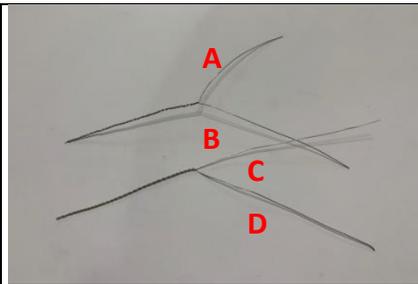


圖 11 兩兩銅線尾端纏繞 6cm

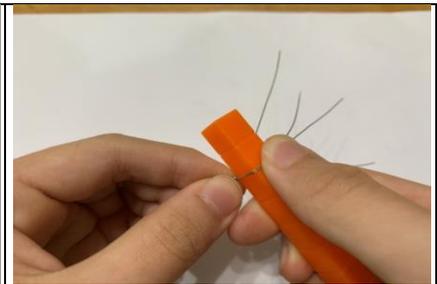


圖 12 兩股銅線各預留 1cm

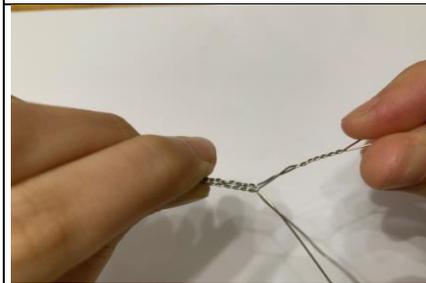


圖 13 預留後的尾端纏繞

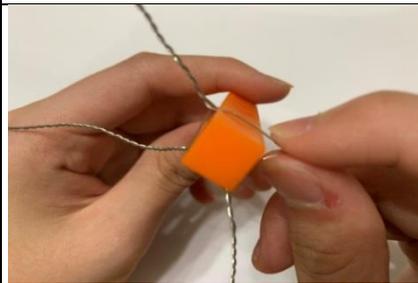


圖 14 預留部分展開框住積木

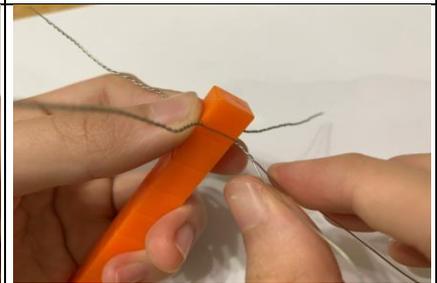


圖 15 剩餘尾端纏繞成一股

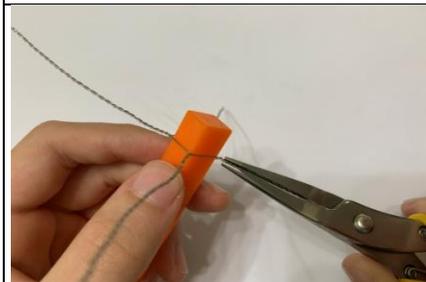


圖 16 用平口鉗扭緊纏繞銅線

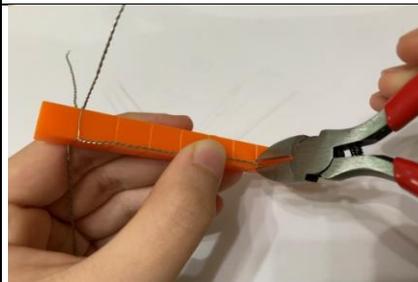


圖 17 纏繞的四股剪成等高



圖 18 纏繞部分往上折 90°

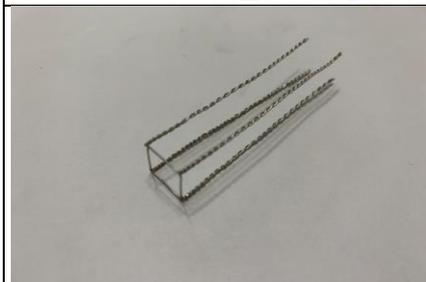


圖 19 完成四節點的方形線圈



圖 20 古氏積木用膠帶黏好

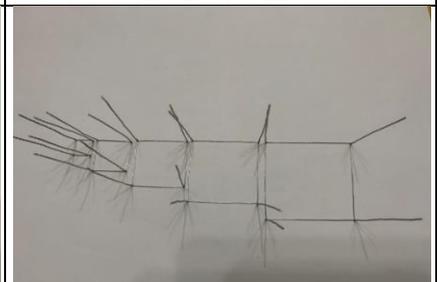


圖 21 完成其他面積的線圈



圖 22 等待膜面乾燥固化

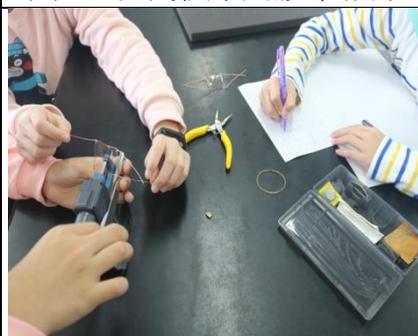


圖 23 使用千分尺測厚度

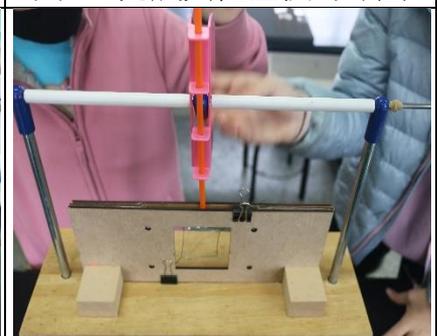


圖 24 自製工具測抗穿刺強度

(三) 實驗結果：

1.邊長愈長的線圈，所框出的面積愈大，愈難沾取膠液。在線圈脫離膠液時，邊長較小

的線圈較不易破裂，邊長愈大的線圈則容易破裂，需要反覆沾取幾次才可成膜。

2.面積愈大的膜面，變形的程度也較大。由圖 19 可看出，邊長 5cm 面積 25cm²的線圈的正方形在膜面乾燥後，兩個直角間的銅線會往中心凹，正方形的邊變成弧線的情形最嚴重。邊長 4cm 面積 16cm²的線圈變形程度其次，邊長 1cm 面積 1cm²的線圈則看不出變形。(如圖 25)

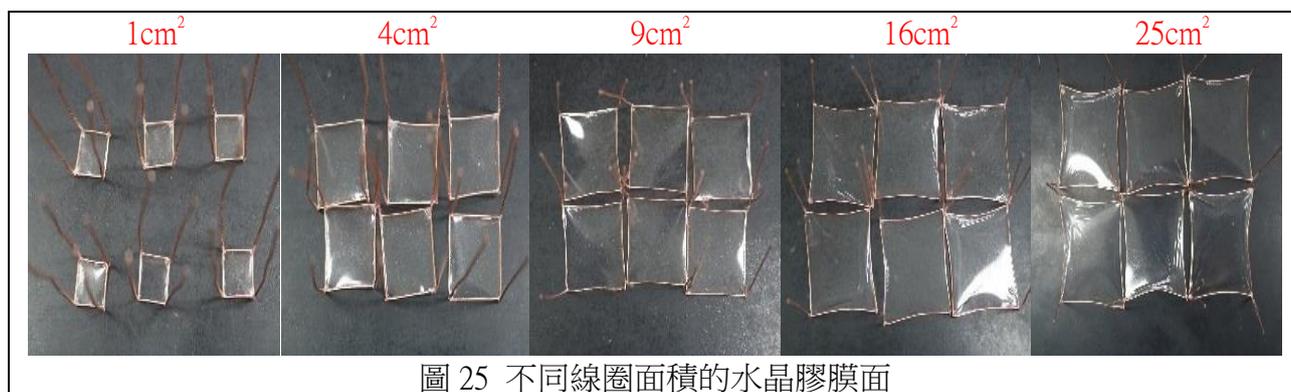
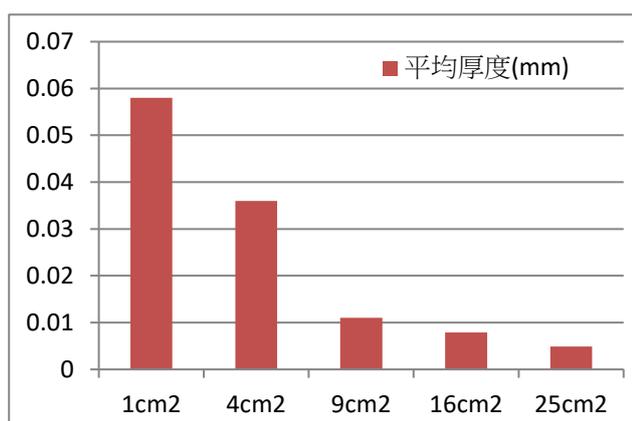


圖 25 不同線圈面積的水晶膠膜面

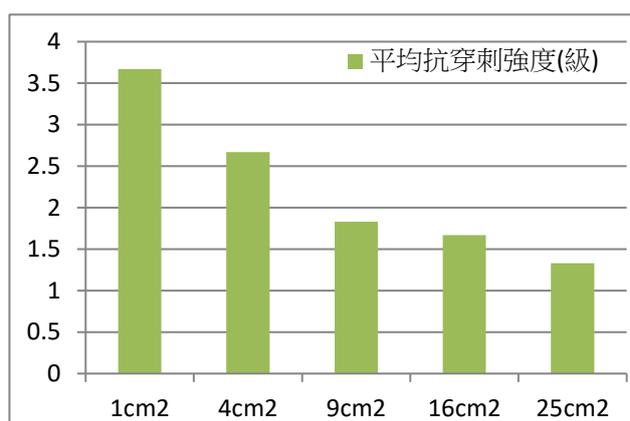
表五 不同線圈面積的水晶膠膜面比較表

	面積 1cm ²	面積 4cm ²	面積 9cm ²	面積 16cm ²	面積 25cm ²
操作比較	最易沾取	最易沾取	容易沾取	較難沾取	最難沾取
平均厚度(mm)	0.058	0.036	0.011	0.0079	0.0049
平均抗穿刺強度(級)	3.67	2.67	1.83	1.67	1.33

3.面積愈小的膜面，中心厚度會較厚，抗穿刺強度愈強。由表五、圖表 1、圖表 2 可看出，邊長 5cm 面積 25cm²的膜面厚度最薄，抗穿刺強度最差；而邊長 1 cm 面積 1 cm²的膜面厚度最厚，且抗穿刺強度最強。



圖表 1 不同線圈面積之膜面厚度比較



圖表 2 不同線圈面積之膜面抗穿刺強度比較

研究問題四：不同銅線粗細對水晶膠最小能量成膜的影響

(一) 實驗器材：同研究問題三

(二) 實驗步驟：

- 1.使用 0.3mm、0.4mm、0.5mm、0.6mm、0.7mm、0.8mm、1mm 等粗細的銅線，製作邊長 4cm 面積 16cm 的線圈。
- 2.線圈沾取膠液成膜後，插在海綿墊上等待乾燥固化。
- 3.使用千分尺與自製檢測工具，測量膜面厚度與抗穿刺強度，記錄後，計算平均並比較。

(三) 實驗結果：

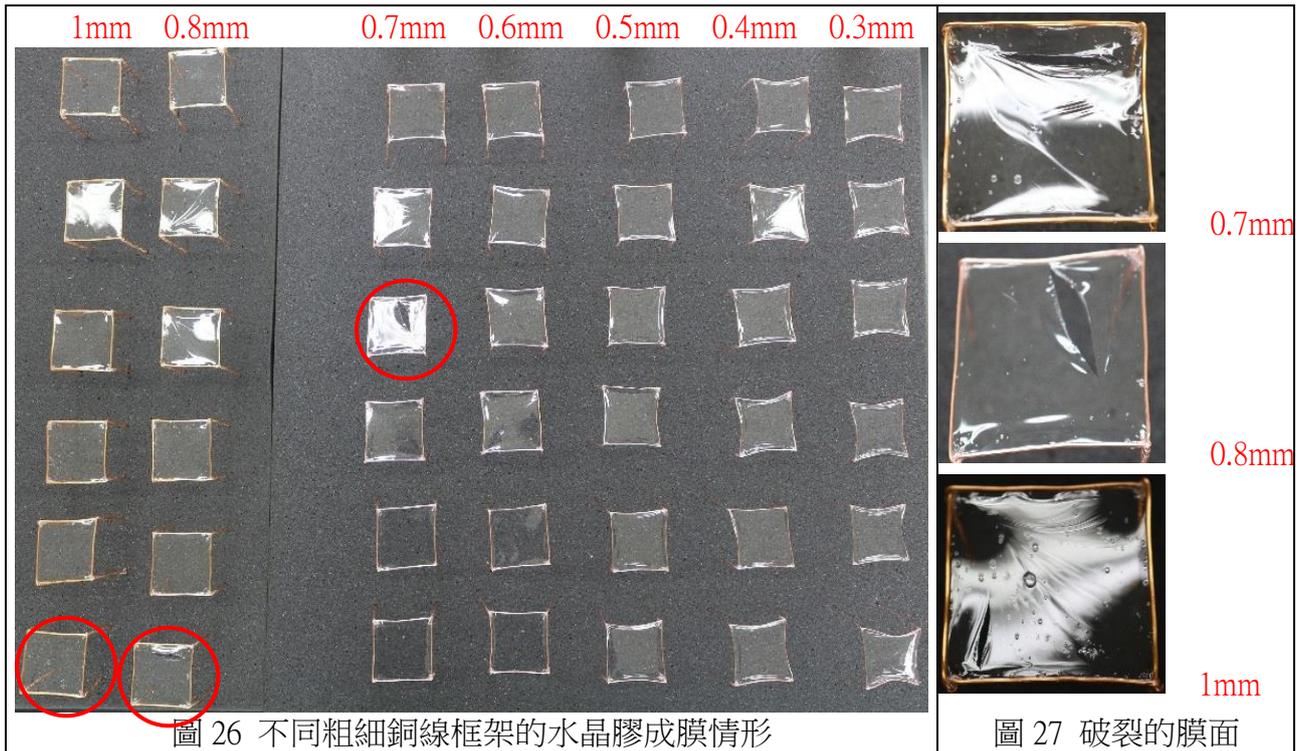


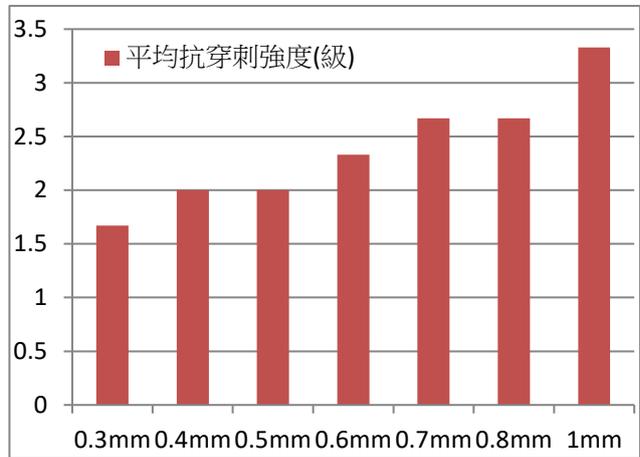
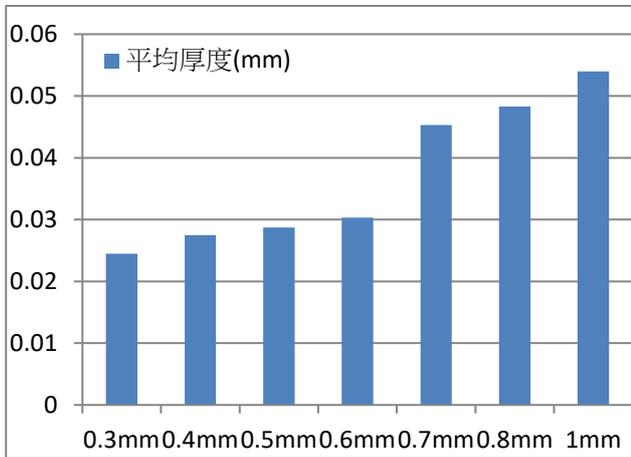
圖 26 不同粗細銅線框架的水晶膠成膜情形

圖 27 破裂的膜面

- 1.銅線直徑較粗的線圈，膜面容易破裂。銅線直徑較細的線圈，變形較嚴重。銅線直徑 0.7mm、0.8mm、1.0mm 的線圈，沾取膠液乾燥後，膜面都有破裂的情況（如圖 27）。而銅線直徑 0.3mm~0.6mm 的線圈則沒有。
- 2.銅線直徑 0.6mm 的線圈雖沒破裂，但卻明顯的變形，正方形的四個邊都有往內凹的情況發生，尤其是 0.3mm、0.4mm 的變形最嚴重（如圖 26）。我們推測，這是膠液乾燥後體積或重量發生改變，造成收縮，拉扯銅線，而愈細的銅線愈容易被拉扯變形，愈粗的銅線較堅固，雖愈不易被拉扯變形，但可能造成膜面繃太緊而裂開。
- 3.銅線愈粗的線圈膜面，厚度愈厚，抗穿刺強度愈強。由表六、圖表 3、圖表 4 可看出，銅線直徑 0.3mm 線圈的膜面厚度與抗穿刺度都是最差的；而 1.0mm 銅線線圈的膜面，雖有可能會因繃太緊而破裂，但厚度與抗穿刺度都是最佳的。

表六 不同銅線粗細的水晶膠膜面比較表

	銅線直徑 0.3mm	銅線直徑 0.4mm	銅線直徑 0.5mm	銅線直徑 0.6mm	銅線直徑 0.7mm	銅線直徑 0.8mm	銅線直徑 1mm
平均厚度(mm)	0.0245	0.0275	0.0287	0.0303	0.0453	0.0483	0.0540
平均抗穿刺強度(級)	1.67	2.00	2.00	2.33	2.67	2.67	3.33



圖表 3 不同銅線粗細之膜面厚度比較

圖表 4 不同線圈粗細之膜面抗穿刺強度比較

研究問題五：不同支架數量對水晶膠最小能量成膜的影響

(一) 實驗器材：同研究問題三

(二) 實驗步驟：

1. 依研究問題四的實驗步驟進行。

2. 但線圈大小全都固定為邊長 5cm 面積 25cm²，銅線粗細改為 0.6mm，節點改為 2 個，且在方形線圈中分別加上 0~3 條支架（如圖 28~39）。

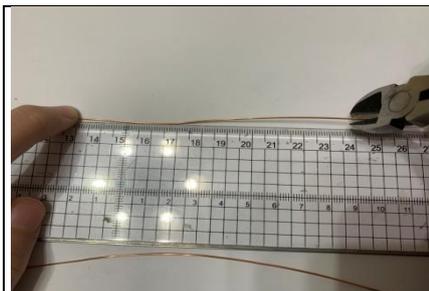


圖 28 剪 0.6mm 銅線 23cm 2 段

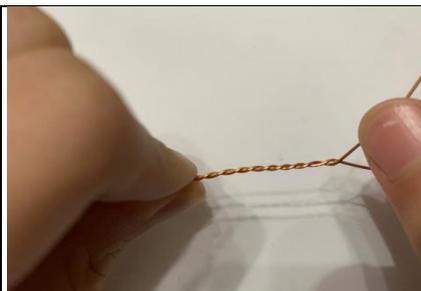


圖 29 銅線前端 6cm 互相纏繞

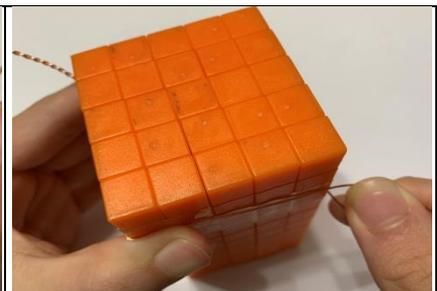


圖 30 銅線打開框住積木

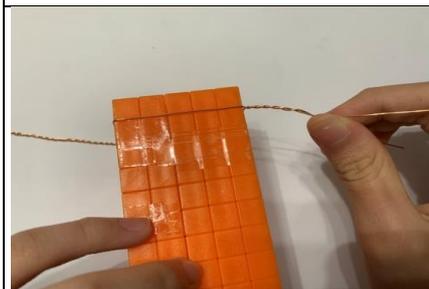


圖 31 銅線尾端纏繞成一股

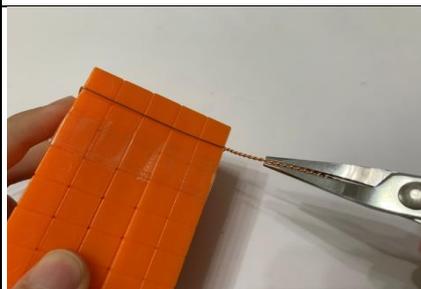


圖 32 用平口鉗扭緊纏繞銅線

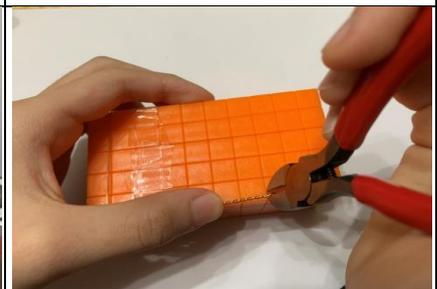
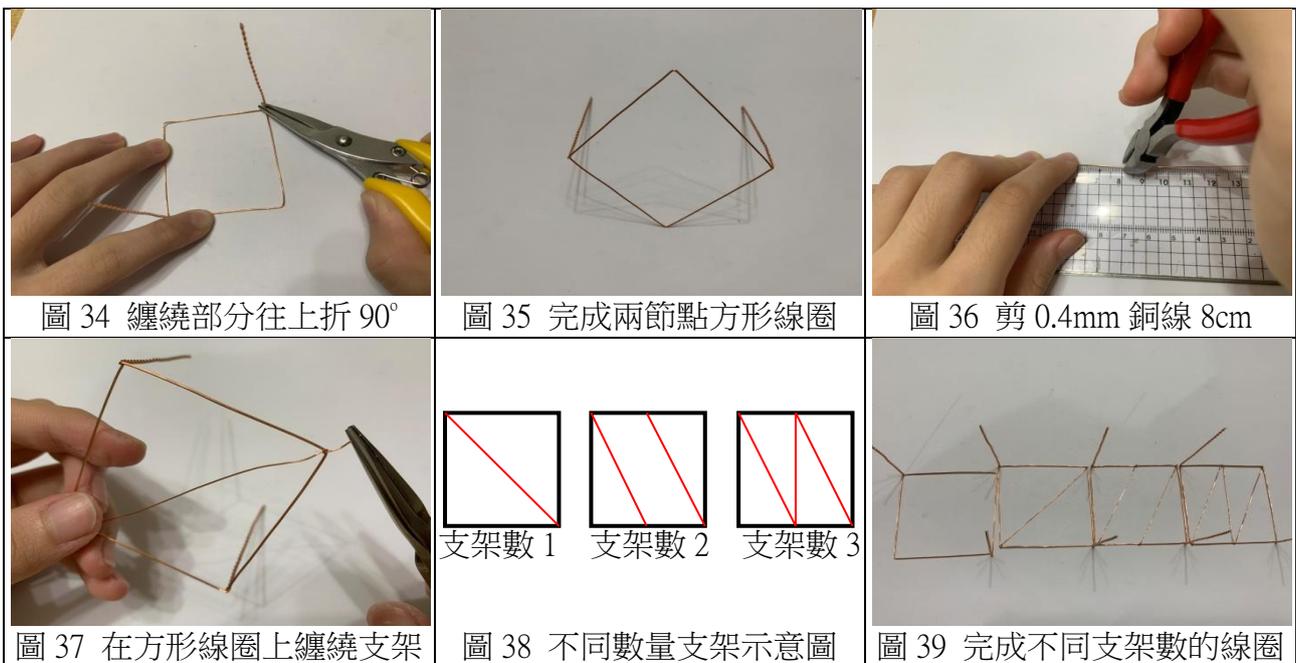
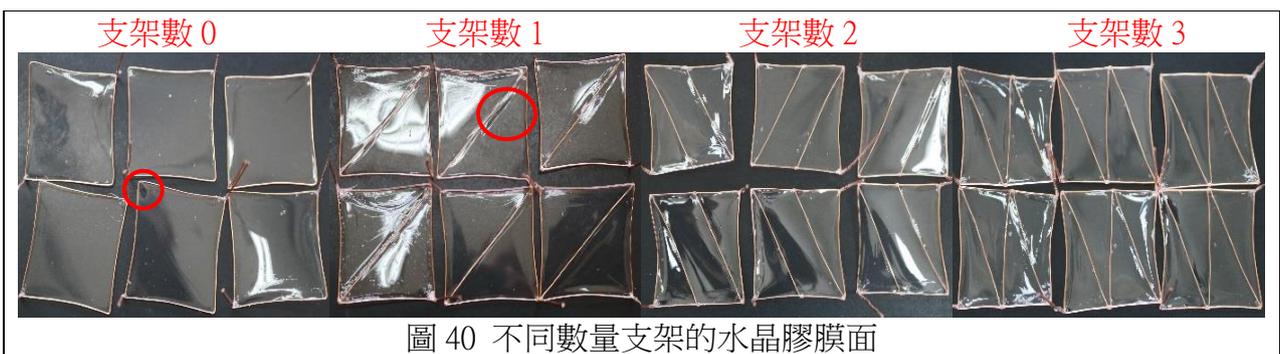


圖 33 纏繞的兩股剪成等高



(三) 實驗結果：

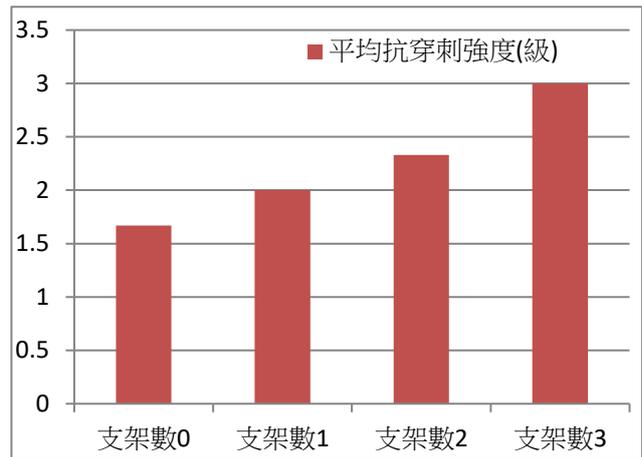
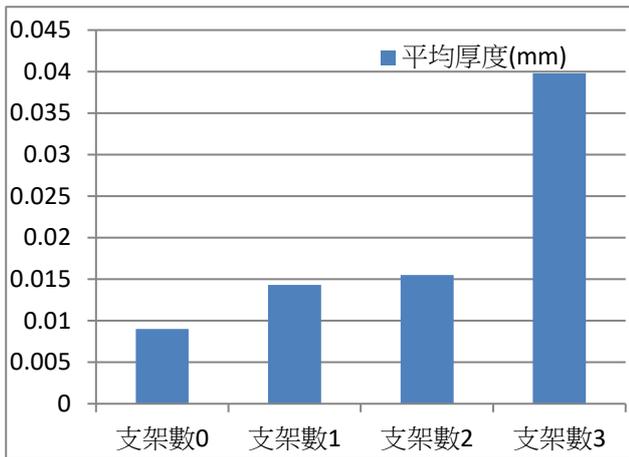
- 1.實驗中為了較好的控制線圈離開膠液的角度，因此，所製作的方形線圈都由 4 條銅線組成，方形線圈的四個角都有線圈纏繞的節點，但此實驗中，為便於在方形線圈中加入支架（圖 37、38），因此，改以 2 條銅線來製作 2 節點線圈（圖 34、35）。
- 2.以面積 25cm^2 的方形線圈而言，用於沾取水晶膠液後，**支架數較多的膜面，較不易在膠液乾燥後膜面破裂**。由圖 40 可看出，支架數 0、1 的膜面出現了乾燥後破裂的情形，而支架數 2、3 的膜面則無破裂情形。



表七 不同支架數量的水晶膠膜面比較表

	支架數 0	支架數 1	支架數 2	支架數 3
平均厚度(mm)	0.0090	0.0143	0.0155	0.0398
平均抗穿刺度(級)	1.67	2.00	2.33	3.00

- 3.**支架愈多的膜面，厚度愈厚，抗穿刺強度愈強**。由表七、圖表 5、圖表 6 可看出，在方形線圈中加入 3 條支架的膜面，不只厚度最大，抗穿刺強度也最強。反之，沒有支架的膜面，厚度與抗穿刺強度都最差。



圖表 5 不同支架數量之膜面厚度比較

圖表 6 不同支架數量之膜面抗穿刺強度比較

研究問題六：不同線圈夾角對水晶膠最小能量成膜的影響

(一) 實驗器材：圓形管束、其餘同研究問題三

(二) 實驗步驟：

1. 依研究問題四的實驗步驟進行。

2. 但線圈改成直徑 1~5cm 的雙圓圈，銅線粗細改為 0.5mm，而且雙圈間打開成 30°、60°、90°、120° 等不同角度的夾角（如圖 41~46）。

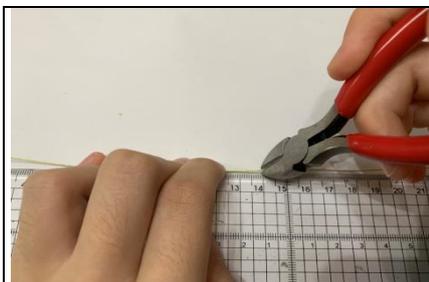


圖 41 剪 2 段 0.5mm 銅線

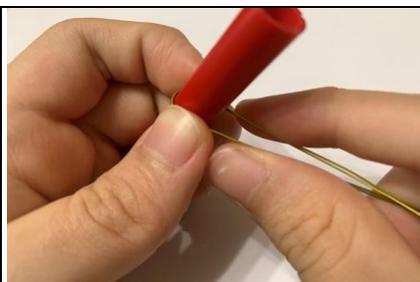


圖 42 兩條銅線同時框住管束

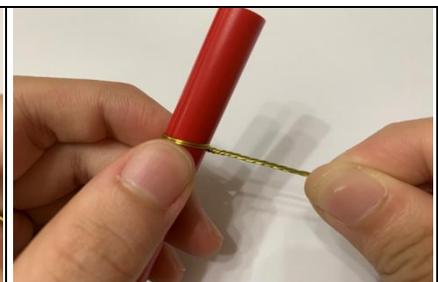


圖 43 銅線頭尾兩端纏成一股



圖 44 用尺將線圈打開成 30°



圖 45 完成不同夾角的線圈



圖 46 完成不同直徑夾角線圈

(三) 實驗結果：

1. 很多花朵的花瓣並不只一片，若是製作重瓣花就必需製作許多花瓣線圈，沾取膠液的次數也會增加，我們除了希望可以減少銅線的消耗，也減省沾取膠液的工序外，還希望多片花瓣同時沾取濃稠的水晶膠液時能不受水晶膠最小能量能膜的影響，形成不互

相沾黏的花瓣，因此，我們想找出線圈間最適當的夾角。

2.雙線圈在沾取膠液後取出時，膠液的重量會使線圈間的夾角改變。且乾燥後會因為膠液的收縮而使夾角變小，**直徑愈大的膜面，夾角變形的程度愈大**（如圖 47~51）。



圖 47 直徑 1cm 的水晶膠膜面



圖 48 直徑 2cm 的水晶膠膜面



圖 49 直徑 3cm 的水晶膠膜面



圖 50 直徑 4cm 的水晶膠膜面

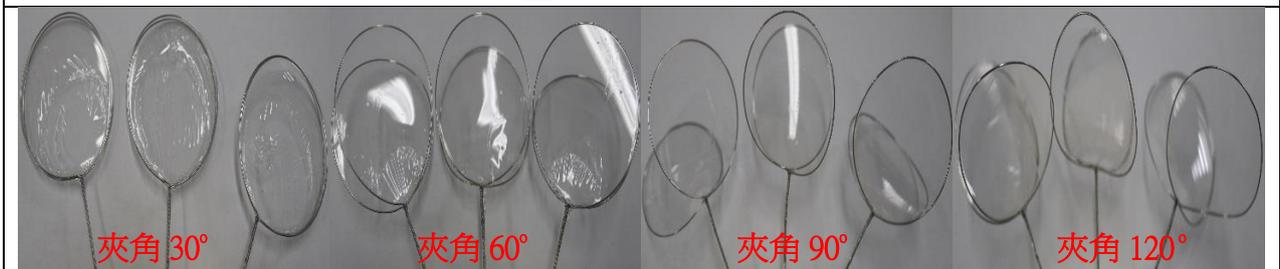


圖 51 直徑 5cm 的水晶膠膜面

3.夾角 $<90^\circ$ 的雙線圈無法形成兩個各自完整的膜面，水晶膠的表面張力會以最小能量成膜，形成最小面積的膜面，夾角呈 30° 與 60° 的線圈，在沾取膠液時，兩個圓膜面靠近

底部的地方會合併成一片，造成兩個圓形線圈無法順利分開。**夾角 $\geq 90^\circ$ 的雙線圈才能形成兩個各自完整的膜面。**(如圖 47~51)

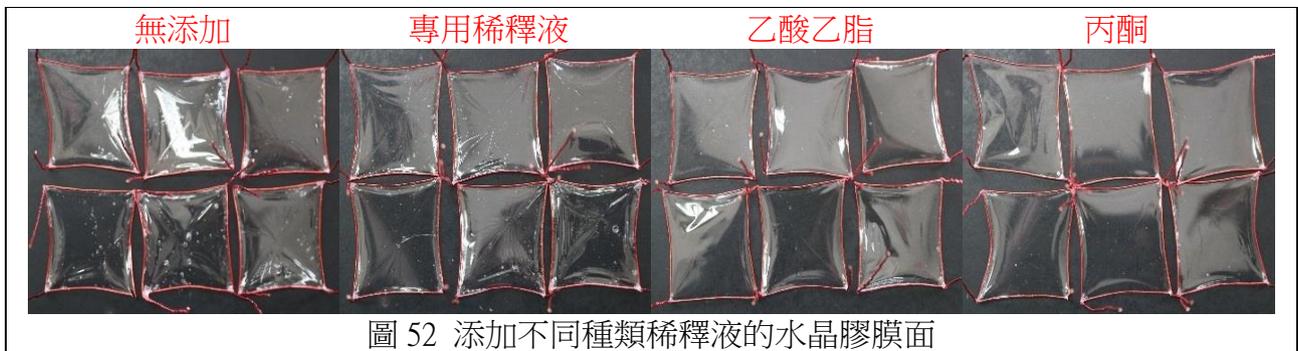
研究問題七：不同稀釋液對水晶膠最小能量成膜的影響

(一) 實驗器材：專用稀釋液、乙醇、丙酮、異丙醇、乙酸乙脂、其餘同研究問題三

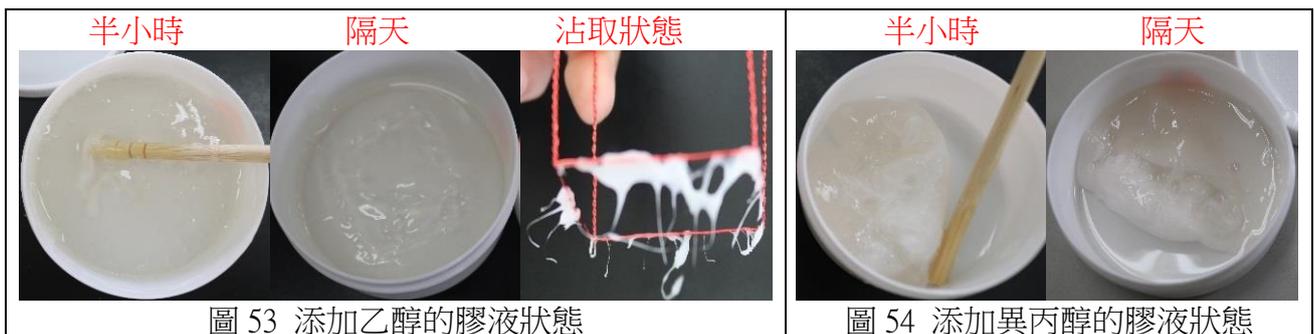
(二) 實驗步驟：

- 1.使用 0.5mm 粗細的銅線，製作 4 個節點、邊長 4cm 面積 16cm²的方形線圈。
- 2.在 6 個 pp 罐中分別秤量 30g 透明水晶膠造花液與不同種類的稀釋液 3g。攪拌均勻後靜置 30 分鐘，在塑膠盒中秤量 1g 的膠液，待 24 小時乾燥後比較重量。另外，用方形線圈沾取膠液比較之。
- 3.剩餘膠液靜置 24 小時後，再重覆步驟 2，並比較之。
- 4.選擇最佳的稀釋液（乙酸乙脂），分別在 30g 原膠液中加入 10%（3g）、20%（6g）、30%（9g）、40%（12g）、50%（15g）的稀釋液攪拌均勻。
- 5.靜置 24 小時後，以方形線圈沾取膠液比較之。

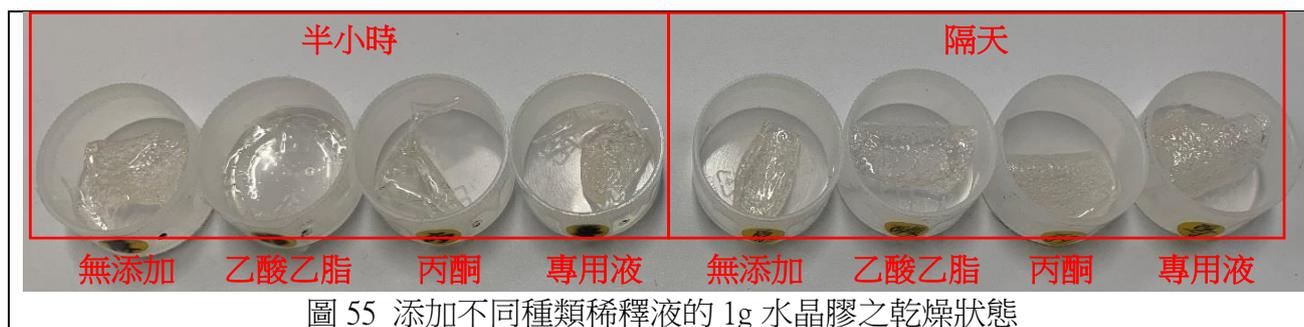
(三) 實驗結果：



- 1.水晶膠變得濃稠不易沾取時，**可使用專用稀釋液、乙酸乙脂、丙酮三種溶劑來當做稀釋液加以稀釋**，添加這三種溶劑稀釋後，膠液會變得較不濃稠，容易沾取，而減少重覆沾取的機會，也能減少膠液產生氣泡的機會，膜面也較光潔，氣泡數量少(如圖 52)。



- 2.本實驗所用之水晶膠**不適合添加乙醇與異丙醇來稀釋**，加入這兩種稀釋液後，攪拌時會發現膠液有成坨和變白的現象。加入乙醇的膠液攪拌後靜置至隔天，前一日出現的白色成坨消失，全部變成透明，膠液變得像果凍狀，反而比未加乙醇前更濃稠，線圈完全無法沾取成膜，而且膠液會很快速的乾燥，乾燥的膠呈現白色（如圖 53、54）。
- 3.**添加專用稀釋液加以稀釋的膠液，乾燥後的重量減輕較少**。最初我們假設膠液減輕的重量多寡與膜面變形的程度有關，但卻無法觀察出這兩者的相關性。



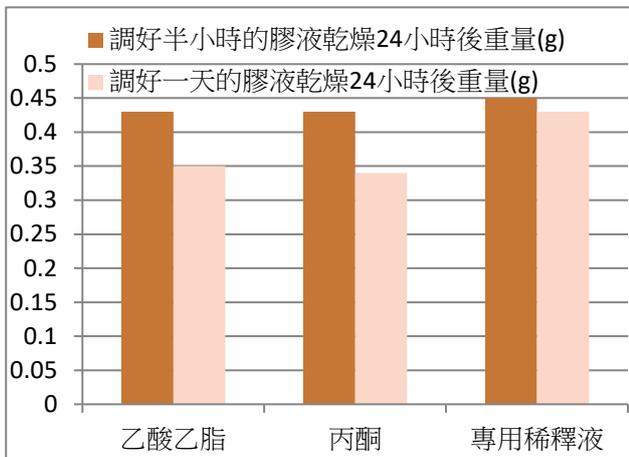
- 4.**添加乙酸乙脂稀釋的膠液膜面氣泡數量少，調製好的膠液不需要等待太長時間就能使用**。由表八、圖表 8 可看出，添加乙酸乙脂稀釋的膠液，不管是剛混合或混合一天後，所形成的膜面氣泡數量都是最少的，且兩天的膜面氣泡數量相差不多。但添加專用稀釋液稀釋的膠液，若在調製好半小時內就沾取使用，膜面的氣泡數量會很多，所以，**使用專用稀釋液來稀釋膠液時，攪拌完成過後必需靜待一段時間才能使用**。

表八 添加不同種類 10%稀釋液的水晶膠造花液半小時內與隔天沾取之膜面比較表

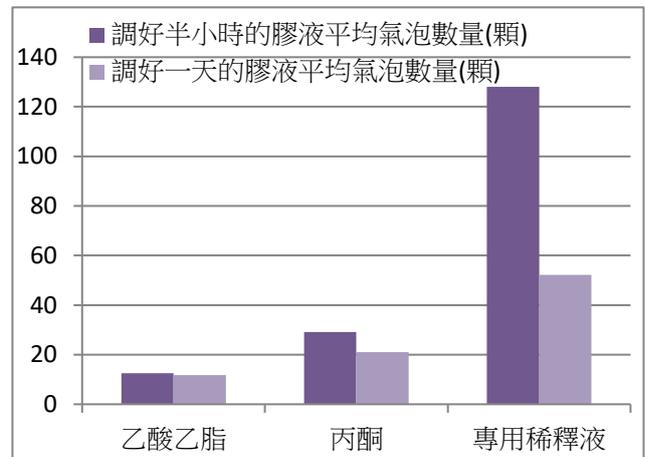
		乙酸乙脂	丙酮	專用稀釋液
調好 靜置 半小時的 膠液	操作比較	容易沾取	容易沾取	不易沾取
	乾燥 24 小時後重量(g)	0.43	0.43	0.45
	乾燥 24 小時後減少重量(g)	0.57	0.57	0.55
	平均氣泡數量(顆)	12.5	29.2	128
	平均厚度(mm)	0.0292	0.0250	0.0428
調好 靜置 一天的 膠液	操作比較	最易沾取	最易沾取	不易沾取
	乾燥 24 小時後重量(g)	0.35	0.34	0.43
	乾燥 24 小時後減少重量(g)	0.65	0.66	0.57
	平均氣泡數量(顆)	11.8	21	52.2
	平均厚度(mm)	0.023	0.0210	0.0310
	平均抗穿刺強度(級)	2.33	2.33	4.33
	平均抗穿刺強度(級)	3.33	3.33	3.00

- 5.**添加稀釋液半小時後的膠液所形成的膜面厚度較添加一天後的膠液膜面厚**。由表八、

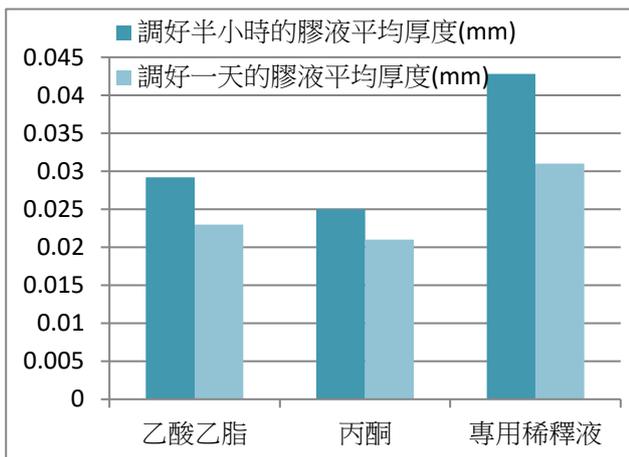
圖表 9 可知，水晶膠在添加三種稀釋液後半個小時內進行沾取的膜面厚度都比一天後沾取的膜面厚，我們推測可能是短時間內膠液還未完全與稀釋液混合的緣故，可能膠液還未被均勻的稀釋。



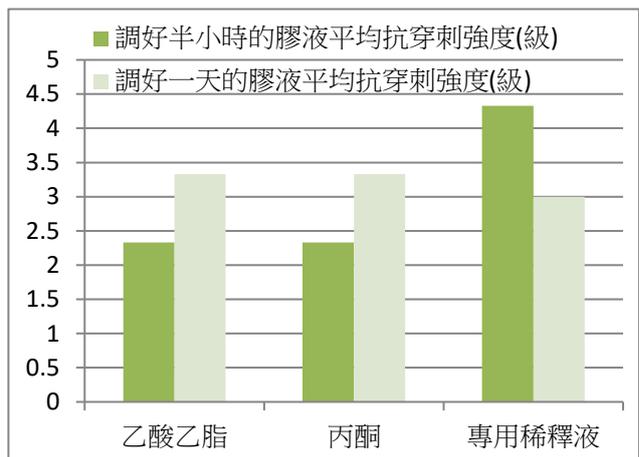
圖表 7 不同稀釋液之膠液重量比較



圖表 8 不同稀釋液之膜面氣泡數比較



圖表 9 不同稀釋液之膜面厚度比較



圖表 10 不同稀釋液之膜面抗穿刺強度比較

6. 添加乙酸乙脂與丙酮一天後的膠液所形成的膜面抗穿刺強度較強；而添加專用稀釋液一天後的膠液所形成的膜面抗穿刺強度反而較弱。由表八、圖表 10 可看出，添加專用稀釋液的膠液，半小時的厚度與抗穿刺強度都比 24 小時的厚且強。而添加乙酸乙脂與丙酮的膠液，半小時的厚度較隔天的厚度厚，但抗穿刺強度卻相反。這結果跟之前研究問題所得一「厚度與抗穿刺強度成正關」相反，我們猜測這可能是因為添加稀釋液半小時的膠液未達均質有關。
7. 由於考慮到稀釋液添加入膠液後便會留在膠液裡，難以再抽離出來，因此，我們選擇以調製 24 小時後的厚度與抗穿刺強度來做比較，並將不同稀釋液的其他特點綜合比較

如表九。由表九可看出**乙酸乙脂是較理想的稀釋液**，因此，接下來進行稀釋液添加比例的實驗，我們就選擇乙酸乙脂進行研究。

表九 不同稀釋液的成效比較表（★代表推薦度）

	單位價格	氣泡數量	沾取容易度	厚度	抗穿刺強度	比較結果
乙酸乙脂	0.18 元/ml★★★★	★★★★	★★★★	★★	★★★★	14★
丙酮	0.24 元/ml★★	★★	★★★★	★	★★★★	11★
專用稀釋液	2.1 元/ml★	★	★	★★★★	★★	8★

8. **添加乙酸乙脂 30%的膠液，所形成的膜面最漂亮**。添加 10%乙酸乙脂的膜面氣泡最多；添加 30%乙酸乙脂的膜面氣泡數量最少，膜面最光亮無瑕；添加 40%、50%乙酸乙脂的膠液狀態過稀薄，線圈上的膠液不僅會在乾燥過程中滴落，膜面也會有明顯的白霧現象（如圖 56~59）。

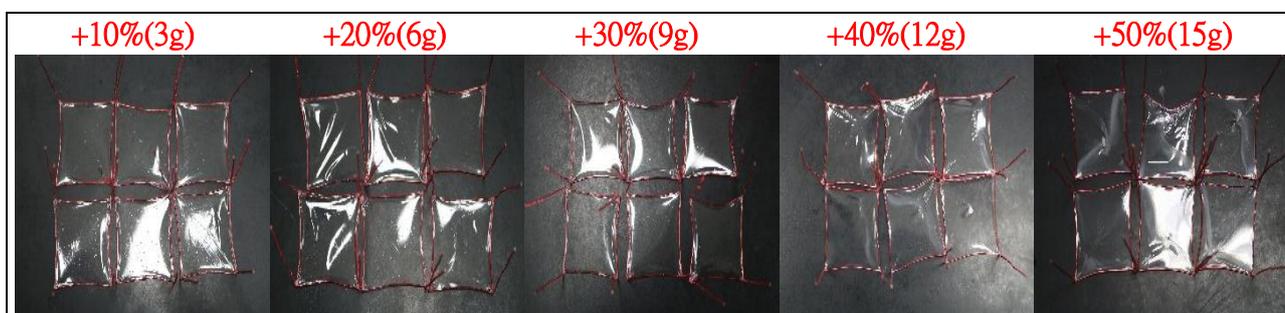


圖 56 添加不同比例稀釋液的水晶膠膜面

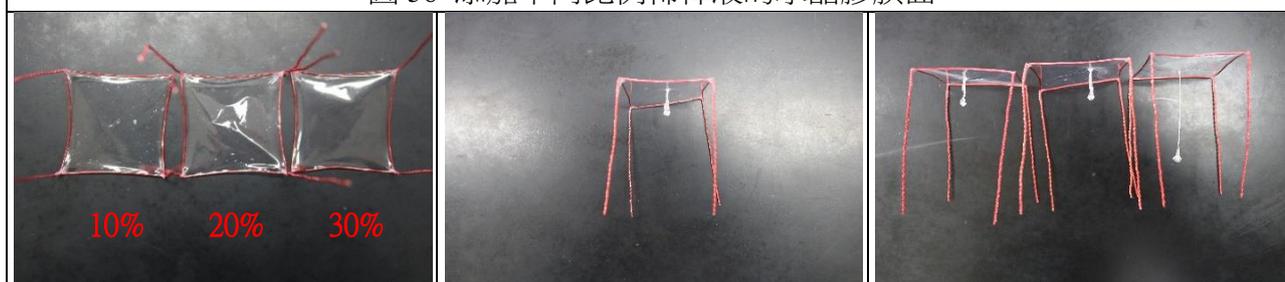


圖 57 加 30%內稀釋液的膜面

圖 58 添加 40%稀釋液的膜面

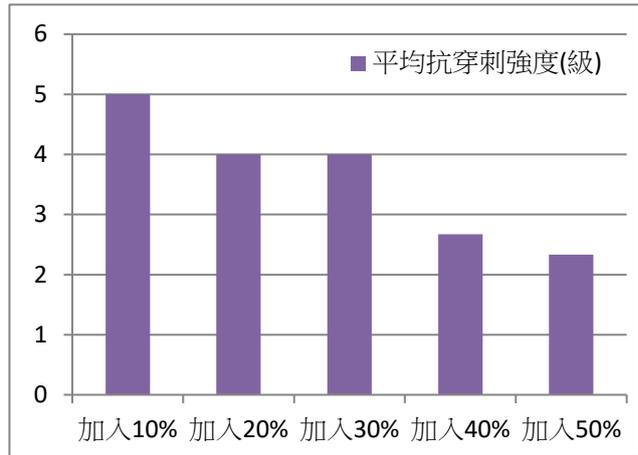
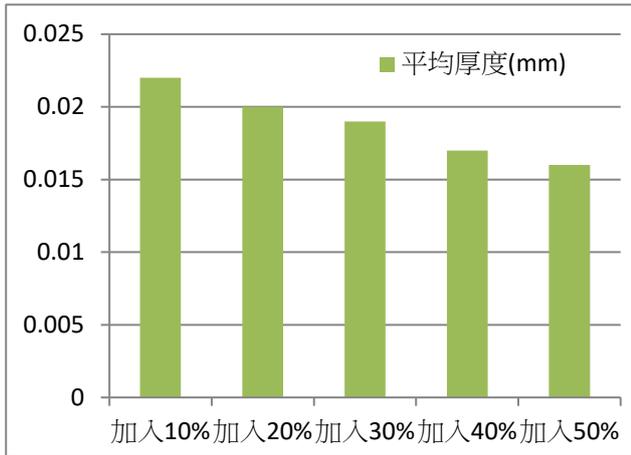
圖 59 添加 50%稀釋液的膜面

表十 添加不同比例乙酸乙脂的水晶膠造花液膜面比較表

	加入 10%(3g)	加入 20%(6g)	加入 30%(9g)	加入 40%(12g)	加入 50%(15g)
操作比較	最難沾取	較難沾取	最易沾取	容易沾取	容易沾取
氣泡數量	最多	其次	最少	會滴落	容易滴落
平均厚度(mm)	0.022	0.020	0.019	0.017	0.016
平均抗穿刺度(級)	5.00	4.00	4.00	2.67	2.33

9. **添加乙酸乙脂比例較少的膠液，所形成的膜面厚度愈厚，所形成的膜面抗穿刺強度愈強**。由表十、圖表 11、12 可看出，添加 10%乙酸乙脂的膜面厚度最厚，抗穿刺強度最強。添加 20%、30%、40%乙酸乙脂的膜面厚度，抗穿刺強度都居中。而添加 50%乙酸

乙脂的膜面厚度最薄，抗穿刺強度也最弱。



圖表 11 不同比例稀釋液之膜面厚度比較

圖表 12 不同比例稀釋液之抗穿刺強度比較

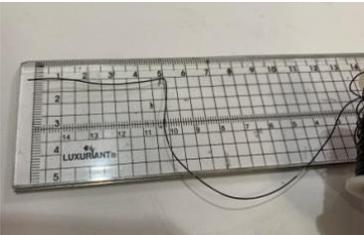
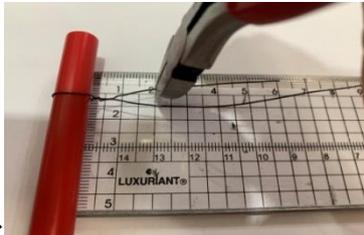
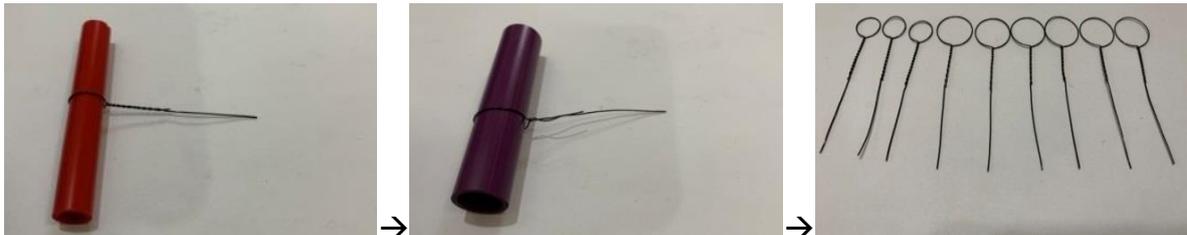
研究問題八：重瓣花的製作方法—最小能量花

(一) 實驗器材：銅線、管束、平口鉗、斜口鉗、水晶膠造花液、海綿墊

(二) 實驗過程：

- 1.在製作水晶花時，若花瓣數量較多（如重瓣花）時，單瓣製作不僅耗費銅線，沾膠的工序也較多，組合時更不好抓取並網綁，因此，我們想找出較理想且合適的線圈纏繞方式，能夠利用水晶膠的最小能量成膜原理又快又好的製作出水晶花。
- 2.我們以 0.5mm 銅線，來製作花瓣總數量 9 片的重瓣花，第一層為直徑 1cm 的花瓣 3 片，第二、三層為直徑 1.5cm 的花瓣各 3 片，如表十一，以不同方式製作線圈進行比較。

表十一 不同線圈纏繞方式的製作方法

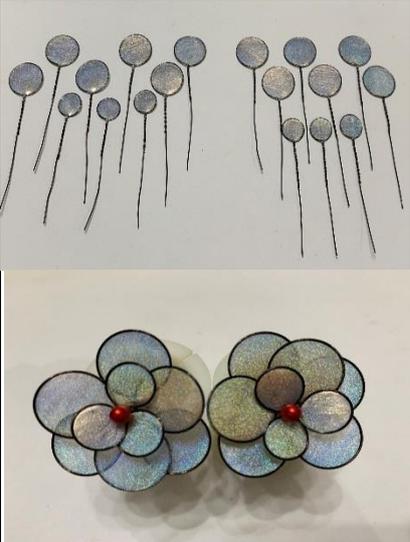
作法	
單圈單節點	前端預留 5cm 後繞管束 1 圈，後端留 2cm 剪下，前後兩端纏繞成一股。
	
	
	
	相同方法完成另兩支直徑 1cm 的線圈，以及 6 支直徑 1.5cm 的線圈。
	



(三) 實驗結果：

表十二 不同製作方法之重瓣水晶花比較表 (★代表推薦度)

	單圈單節點	多圈單節點	多圈多節點
重量比較	★	★★★★	★★★
	沾膠前線圈重 1.47g 組合完成重量 1.99g 最費銅線、重量最重	沾膠前線圈重 0.87g 組合完成重量 1.26g 最省銅線、重量最輕	沾膠前線圈重 0.96g 組合完成重量 1.31g 重量中等
	★★★★	★	★★★
操作比	1.線圈製作非常簡易，節點固定非常牢固，線圈不會鬆動。	1.線圈製作最有難度，節點不牢固，分開線圈時易鬆動。	1.線圈不難製作，節點固定牢固，線圈不會鬆動。

較	2.沾取膠液時操作也容易。 3.多個線圈接抓緊，纏繞組合，多個線圈中心可以沒有距離，但組合時較難抓握。 4.花瓣間的距離較自由。	2.沾膠前，多個線圈間必打開調整線圈間的夾角 $\geq 90^\circ$ ，要注意是否每個線圈都成膜。 3.乾燥後要翻轉線圈才能組合，膜面易有皺紋或破裂。 4.線圈中心沒有距離，第二、三層會有花瓣完全重疊。	2.線圈間是分開的，沾膠前可不調整線圈間的距離，但要注意是否每個線圈都成膜。 3.多個線圈中心會多出一個小圈，線圈數愈多，中心的圈會愈大。
適	★★★★	★	★★
用	1.沒有限制。	1.單層花瓣的花朵。 2.花朵的中心花瓣。	1.非中心的花瓣。
性			
成			
	圖 60 單圈單節點成品	圖 61 多圈單節點成品	圖 62 多圈多節點成品

1.重瓣花的製作需先把花朵分層，以上述實驗而言，花朵分3層，每層3片花瓣，總共9片花瓣的重瓣花。在花朵中心沒有阻礙的單圈單節點製作方式及花瓣中心有空洞的多圈多節點製作方式中，花瓣都能順利組合完成（如圖 60、62）。但花瓣太過緊密而中心無空間的多圈單節點製作方式，則無法組合能看出9片花瓣的花朵樣子（如圖 61）。

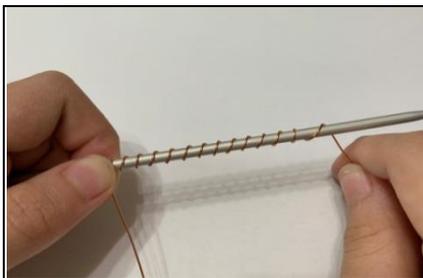


圖 63 銅線纏繞成彈簧狀

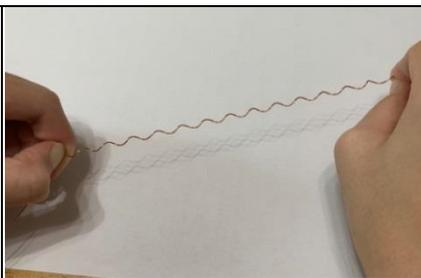


圖 64 拉開彈簧狀的銅線



圖 65 扭曲銅線框住管束固定

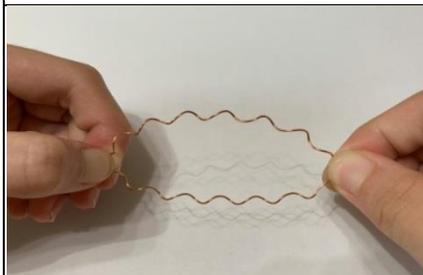


圖 66 將圓形線圈拉長成葉形



圖 67 葉子中間上支架



圖 68 沾取膠液



圖 69 膜面背後上色



圖 70 加上紅色珠子裝飾



圖 71 纏繞組合成聖誕吊飾

2.我們運用單圈單節點的做法，模仿鋸齒狀葉緣與網狀葉脈的形態，製作非平滑邊緣的線圈。因研究問題五的實驗結果，增加支架可減少大面積膜面的破裂的情形，因此，我們
在非平滑邊緣且面積較大的線圈中加入支架，做成聖誕紅吊飾（如圖 63~71）。

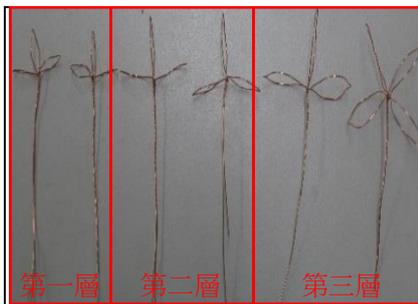


圖 72 製作多圈單節點線圈



圖 73 線圈翻轉後沾取膠液



圖 74 上色並組合成完整花朵

3.多圈單節點方式製作的圓形線圈雖然不能組合出理想花朵，卻能節省許多銅線的消耗，因此，我們仍想找出它適合的作法。討論過後，我們嘗試改變線圈形狀，做出類似菱形的花瓣。由於研究問題六得知，線圈間夾角需 $\geq 90^\circ$ ，因此，我們再並加入對稱的概念，同一層的花瓣拆成左右兩支線圈來製作（如圖 72~74）。這雖然可以解決花瓣重疊的問題，但每層的花瓣數需 >3 片，才適合用多圈單節點的方法製作。



圖 75 製作線圈並沾膠



圖 76 上色



圖 77 組合成三色堇

4.我們嘗試結合兩種線圈的製作方式，運用單圈單節點與多圈單節點的方法，並用尖嘴鉗將單圈的線圈拗折成心形，與兩個尺寸的雙橢圈線圈，組合成三色堇。（如圖 75~77）
5.進一步嘗試結合多圈單節點與多圈多節點的方式，製作類似梭形的花瓣，組合成更繁複的花朵。由於研究問題七發現添加 30%乙酸乙脂的水晶膠造花液不僅沾膠容易且氣泡數少，因此我們在製作多圈單節點的線圈時繞了 5 圈，展開成 5 片花瓣，嘗試縮小

花瓣間的夾角（如圖 78）。結果發現，使用添加 30% 乙酸乙酯的水晶膠造花液能夠縮小花瓣線圈間的夾角，花瓣間夾角即使 $< 90^\circ$ ，沾取膠液時，中心也沒有多餘的殘膠，乾燥後能夠順利的翻轉花瓣方向進行上色，並塑形組合（如圖 79~82）。



研究問題九：立體型體的直接沾取—造成最小能量成膜

(一) 實驗器材：同研究問題八

(二) 實驗過程：

1. 製作不同形態的多面立體線圈（如柱體、錐體與球體線圈）。（如圖 84~89）
2. 製作不同形態的單面立體線圈（如扭轉與彎曲線圈）。（如圖 90~92）
3. 將各種線圈以直接沾取法沾膠，形成膜面比較之。

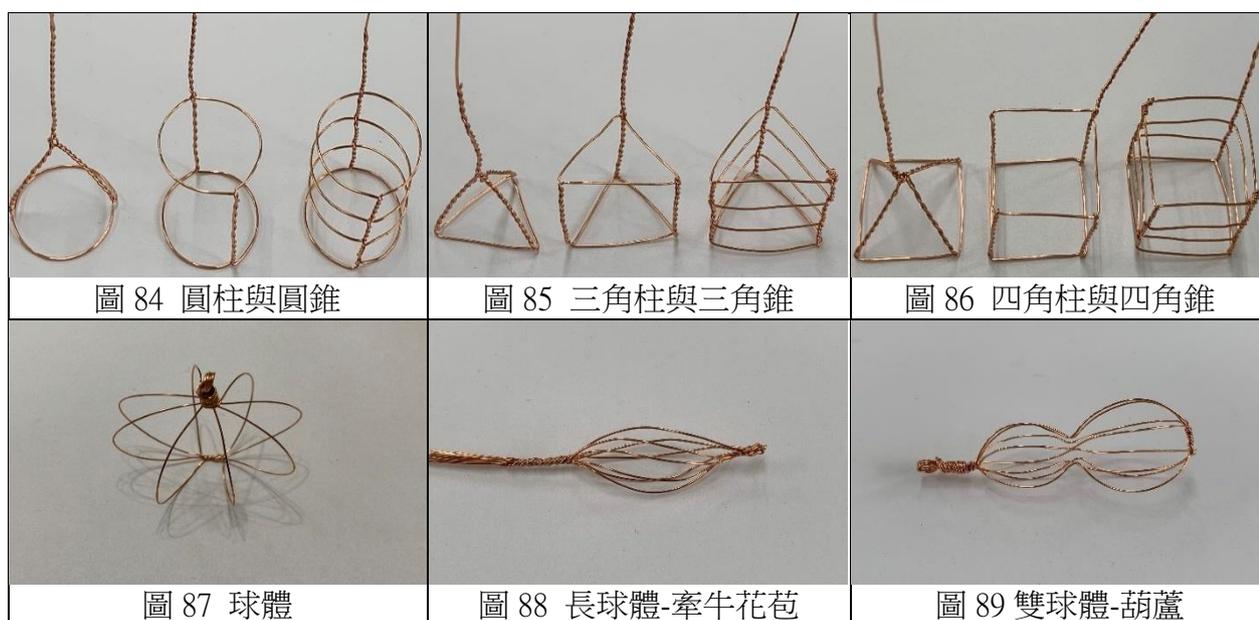




圖 90 彎曲花瓣

圖 91 扇貝殼

圖 92 蝴蝶結

(三) 實驗結果：



圖 93 各種柱體的直接沾取

圖 94 各種錐體的直接沾取

圖 95 各種球體的直接沾取

1. **直接沾取法會使錐體與柱體形成最小面積膜面，而不會在表面形成膜面。**水晶膠的表面張力與附着力達到平衡時，可看出最小能量膜面並非形成在立體形體的外部，而是在這些錐體或柱體的內部，會**形成由每個邊向內部中心交集的膜面**（如圖 93、94），可能會交集出一條線或一個平面。
2. **側面有支架的柱體，使用直接沾取法，會形成非封閉的最小面積膜面。**頂面的膠液會因重力下拉，使其附著在側面四個垂直面的支架上，最後得到只有五面膜面的筒狀形態（如圖 93）。
3. **直接沾取膠液的方法無法製作出完整的球形膜面。**一開始我們使用直接沾取膠液的方法製作球形，但球形線圈從膠液中在取出時，因為膠液往下流的力量，會造成部分已經成形的膜面被一起帶走，無法成功製作出球形的膜面（如圖 95）。



圖 96 彎曲花瓣組合成玉蘭花

圖 97 扇貝殼膜面

圖 98 蝴蝶結膜面

4. **平面圖形彎曲或扭轉形成的線圈用直接沾取法形成的最小面積膜面就是所需要的膜面**（如彎曲花瓣、扇貝殼與蝴蝶結）。單面的封閉線圈扭曲而成的立體形體，都可利用直

接沾取法成功製作出所需的膜面（如圖 96~98）

研究問題十：立體型體的間接沾取—克服最小能量成膜

（一）實驗器材：同研究問題九

（二）實驗過程：

- 1.同研究問題九，製作不同形態的多面立體線圈（如柱體、錐體與球體線圈）。
- 2.以間接沾取法沾膠，形成膜面比較之。（如圖 96~97）



圖 99 失敗的間接沾取法(往返)

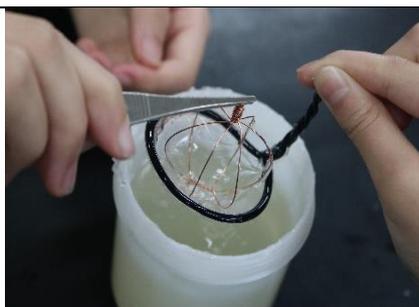
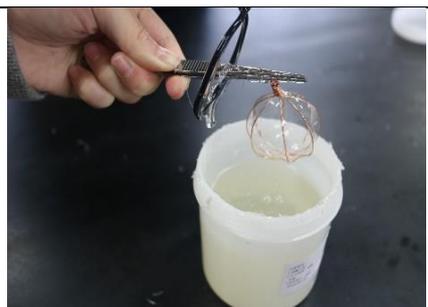


圖 100 正確的間接沾取法(只往不返)



（三）實驗結果：

- 1.為解決球體因膠液受重力作用往下流，而導致膜面無法成形的狀況，我們嘗試**用已經成形的膜面來包覆球體**的方法。由研究問題四得知，愈粗的銅線形成的膜面厚度與抗穿刺強度也愈佳，因此我們選用 2 mm 的鋁線製作一個圓形線圈，先用鋁線線圈沾取膠液，使水晶膠在這個鋁線線上形成膜面，再用此膜面套過球形線圈。但這方法一開始只成功一半，膜面能成功包覆，但圓框線圈在往回拉的取出過程，膜面又被破壞（如圖 99）。
- 2.**只往不返的間接沾取法可成功克服最小能量成膜，在多面立體形體上形成表面膜面。**我們利用鑷子夾住球形線圈，待膜面包覆好後，鋁線線圈再先不急著移走，用另一支鑷子**先將包覆好膜面的球形線圈夾走**，避免膜面因鋁線圈往回拉或殘餘流下的膠液破壞，這樣就能完成漂亮的球形、長球形與各種柱體的表面膜面（如圖 100~102）。



圖 101 各種球體的間接沾取



圖 102 各種柱體的間接沾取



圖 103 各種錐體的間接沾取

3. **雙球體的中間內縮部位無法完全克服最小能量成膜**。雖然使用間接沾取法包覆雙球體的表面，但雙球交界的部位，膜面無法貼合包覆在內凹的銅線上，反而形成較短的曲面，可看出最小能量成膜的影響（如圖 101）。

6. 我們嘗試結合球體與單圈單節點方式兩種方法，做出十二線球形與做成的不規則線圈，製作萬聖節南瓜。（如圖 102~104）



圖 104 十二線球形



圖 105 眼睛與嘴巴的線圈



圖 106 沾膠後組合

7. 另外，我們結合立體與多圈單節點的兩種方法，製作六線球形後拉長成梭形，加上 3 + 2 瓣花瓣做成蒂頭，模仿出香椿果實。（如圖 107~109）



圖 107 乾燥的香椿果實



圖 108 六線梭形與蒂頭



圖 109 仿做出香椿果實

柒、結論

一、影響水晶膠**最小能量**成膜狀態的因素：

水晶膠最小能量膜面的厚度與抗穿刺強度成正相關。因此，在製作水晶花作品時，若希望作品較耐久不易破損，製作過程中，需要**選用愈粗的銅線、製作較小面積的線圈、加上較多的支架**，如此可以做出較厚且抗穿刺強度較強的水晶膠膜面。

（一）**線圈的面積**：面積愈小愈容易沾取膠液，形成的膜面厚度與抗穿刺強度也愈佳。

（二）**銅線的粗細**：銅線愈細膜面愈容易變形，乾燥後的厚度與抗穿刺強度也愈差。

（三）**支架的數量**：支架數愈多膜面愈厚，乾燥後的膜面抗穿刺度也愈佳。

（四）**線圈的夾角**：當線圈底部纏繞在一起時，**線圈需打開成 $\geq 90^\circ$ 的夾角**，避免沾取膠液後互相沾黏，而無法形成各別單獨的膜面。

（五）稀釋液使用：

- 1.最佳稀釋液—水晶膠造花液濃稠不好沾取時，可用**乙酸乙脂、丙酮、專用稀釋液**來稀釋。其中以**乙酸乙脂最佳**，除了價格較便宜外，膜面的氣泡數量最少，最光潔美觀。
- 2.使用時間點—加入稀釋液後，**不可立刻使用，需靜置超過半小時的時間再使用**，可獲得抗穿刺強度較佳的膜面。
- 3.添加的比例—以乙酸乙脂而言，**添加膠液總重量的 30%**是最好沾取的狀態，膠液不會太稀薄而滴落，膜面的氣泡數也最少，還可以縮小線圈間的夾角。

二、使用水晶膠造花液的最佳操作方法：

（一）直接沾取：平面線圈、單面立體線圈都能形成**最小能量膜面**

- 1.**單圈單節點成膜**—消耗銅線最多，工序最繁複，但膜面破裂時最容易補救，且**適用性最廣**，所有花瓣都可用此法製作。
- 2.**多圈單節點成膜**—消耗銅線最少，可減少沾膠的次數，但**適用於花瓣細長，或單層花瓣數>3片**的花朵，更要注意花瓣線圈間分開的夾角，以免相鄰花瓣因最小能量成膜而互相沾黏，最後無法分開，且線圈翻轉時膜面會因拉扯產生皺紋。
- 3.**多圈多節點成膜**—消耗的銅線不算多，也可減少沾膠的次數，但線圈中心會多一小圈，花瓣線圈數愈多，中心的圈會愈大，因此，**較不適用於中心層的花瓣，其他均可**。
- 4.**非平滑邊緣成膜**—若**線圈面積較大則需加上支架**，較容易成膜。
- 5.**單面立體成膜**—以上述 4 種方式纏繞線圈後，再將線圈變形，或扭轉或彎曲，形成**單獨的曲面，都可順利得到所需要的膜面**。
- 6.**多面非封閉立體成膜**—在柱體的側面加上支架，在最小成膜力量與重力作用下，會形成**缺少頂面**的非封閉立體膜面。

（二）間接沾取：多面封閉立體成膜需克服**最小能量膜面**

- 1.正確作法—要讓水晶膠膜面包覆在錐體、柱體或球體外，形成封閉的多面立體膜面時，必需另外用較粗的金屬線，製作較大面積的線圈，先沾取膠液成膜後，再將**金屬線圈上已形成的膜面包覆到立體形體上**，才能克服最小面積成膜的影響。

2.避免失敗—金屬線圈上的膜面包覆好球形後，需先將球形線圈移走，**金屬線圈的膜面在包覆多面立體形體後，線圈只往而不返**，以免殘餘的膠液滴落而破壞已經包覆好的膜面。

捌、討論與建議

一、**表面張力最小面積成膜是成功關鍵：**

在製作水晶膠花時，若能事先從最小面積成膜思考，那麼就能盡可能減少失敗的機率。不同的水晶膠作品有不同方向或大小的成膜需求，如平面、筒狀、球狀等，若只是做好邊界或外框就直接沾取膠液，很可能無法得到所需要的膜面。必需在製作好外框後，考慮最小表面張力的能量，在需要形成膜面的銅線邊框中增加支架，再沾取膠液才能成功。而完全封閉的立體型體在沾取膠液時，則需使用另外的線圈先形成最小面積膜後再包覆，克服膠液直接在封閉立體型體中的最小成膜力量和重力，才能成功得到所需要的膜面。

二、**成功自行研發膜面特殊檢測工具：**

膜面檢測是我們這個研究中最重要比較依據，厚度還能透過千分尺測量，但抗穿刺強度就難了。最初我們從作品的耐用度發想，但耐用度的範圍太廣，幾番討論後終於聚焦在膜面的耐受度上。一開始我們想要以耐重度來檢測膜面，但重物太大會受銅線線圈影響而無法真正檢測到膜面。之後想到配戴在身上的飾品可能被指甲勾拉或刺破，才改變為抗穿刺度的檢測。然而，從第一版工具到第四版工具，中間不斷測試，不斷改良工具，也改變線圈以適配工具，前後耗時 3 個月以上，感覺自己耗損了許多腦細胞，但在完成確定版工具的那一剎那，成就感實在無可比擬。

三、**手作纏繞銅線線圈是耐心挑戰：**

在製作線圈時，每次的纏繞都沒辦法與前一次完全相同，拉扯的力量、扭轉的力道或是彎折的弧度都不大相同，這會影響銅線線圈的緊繃度，也影響在沾取水晶膠造花液時的量。尤其在製作立體線圈時更是困難，不是銅線沒順好，就是纏繞固定點移位，重做了數個才能得出較對稱的球形或立體形體，極度考驗了我們的手工能力和耐心。

玖、參考資料及其他

1.李品慧（2019）。**表面張力（Surface tension）的量度**。取自

玖、參考資料及其他

- 1.李品慧（2019）。**表面張力（Surface tension）的量度**。取自
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1412>
- 2.維基百科（2020）。取自
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%A8%E9%9D%A2%E5%BC%A0%E5%8A%9B>
- 3.中興大學物理學系普通物理實驗室（2020）。**表面張力**。取自
http://experiment.phys.nchu.edu.tw/ex_h.htm
- 4.李彥霆、林冠豪、陳立珩（2016）。**泡泡面面觀**。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 5.周昕諭（2016）。**正多面體之皂膜最小表面能之探討**。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 6.林品汝、倪羽薇、王釋玄（2015）。「**癭室**」了得，硬是了得！**探討椽果壯缺普癭蚋的生態及生物防治可行性**。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 7.黃翊瑄、張至騫、藍以丞、洪御翔、陳亦敬、楊博翰（2018）。**渾身解塑—以回收紙漿和洋菜製作可分解垃圾袋**。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 8.陳旻琦、陳怡萱、孔妤瑄、吳承諭、楊子宜、陳立揚（2010）。**肥皂熟了，水知道**。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 9.黃鎔楷、陳韋齊、張翔硯、王奕欽（2018）。「**筆**」一「**筆**」，誰最「**蠟**」。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 10.劉權毅醫師部落格（2012）。**如何看懂指甲油成分**。取自
<https://yanjiskin.pixnet.net/blog/post/229205501>
- 11.每日頭條（2018）。**GB/T10004 標準關於包裝塑料複合膜穿刺強度測試方法**。取自
<https://kknews.cc/zh-tw/news/xp8zep8.html>

【評語】 082906

本研究從勞作課作品衍伸成科展作品，符合生活化方向，關於表面張力的學理應用與檢測如能以科學數據驗證或呈現更佳。

研究動機

無意中在網路上看到水晶花的介紹，我便自己購買水晶膠造花液製作後，希望了解其成膜原因，查了表面張力的資料後與好友一起研究。

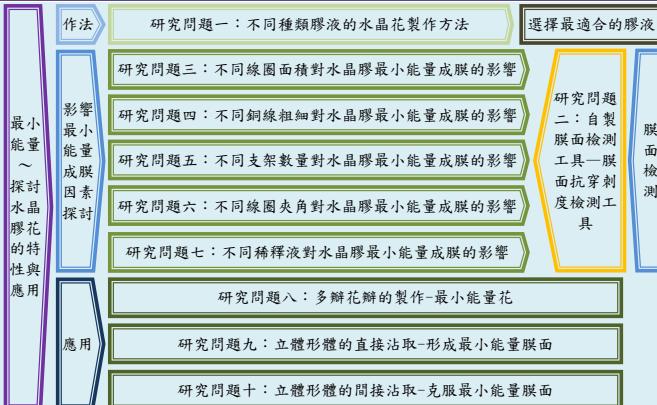
研究目的

尋找適合操作與研究的水晶膠液
尋找或自製膜面檢測工具
研究水晶膠造花液的特性
應用於多瓣與立體形體

研究設備及器材

水晶膠造花液、乙酸乙脂、丙酮、專用稀釋液、銅線、螺旋測微器、自製抗穿刺強度工具

研究概念流程



研究過程、方法與結果

研究問題一：

不同種類膠液的水晶花製作方法

1. 各種造花液的製作過程比較

	指甲油	UV 膠造花液	水晶膠造花液
塑形	將金屬線圈折成需要的花瓣大小與形狀。		
準備	倒出以便沾取	加入色液調色	
沾膠	線圈沾裹膠液後再取出，使線圈中形成膜面		
固化	靜置待乾燥	照紫外燈固化	靜置待乾燥
上色	用有色指甲油可不上色。		使用有色膠液可不上色。
組合	將花瓣依序組合綁緊並剪除多餘的金屬線尾		
強化	塗透明指甲油	塗 UV 硬膠	熱風槍吹整

2. 各種造花液的使用比較表 (★代表推薦度)

項目	指甲油 10 元/ml ★	UV 膠 18 元/g	水晶膠 3.25 元/ml ★
工具	工具最少(容器) ★★	工具最多(紫外燈、容器與色液)	工具不多(熱風槍與指甲油) ★
操作	需倒出、不需調色、難沾取時加去光水或丙酮改善 ★★	需倒出、需先調色、一段時間後膠會結塊需重新調製	開罐即可、可不調色、表面結皮可搖晃改善 ★★★★★

保存	沒用完的指甲油難倒回 ★	沒用完的膠液無法保存、存放不透光處	直接蓋上、濃稠時加專用稀釋液 ★★★★★
受限性	單罐容量太少。 ★	>1cm ² 部件不易沾膠	部件大小小於罐口，才可沾取膠液。 ★★

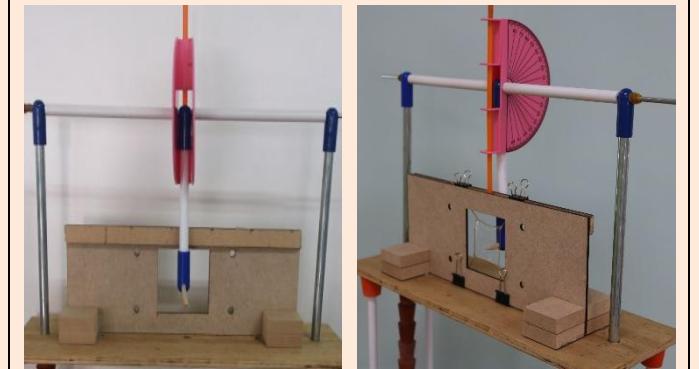
研究問題二：

膜面抗穿刺強度測量工具製作

1. 歷經了三版的失敗才完成工具。



第四版-角度+長度版

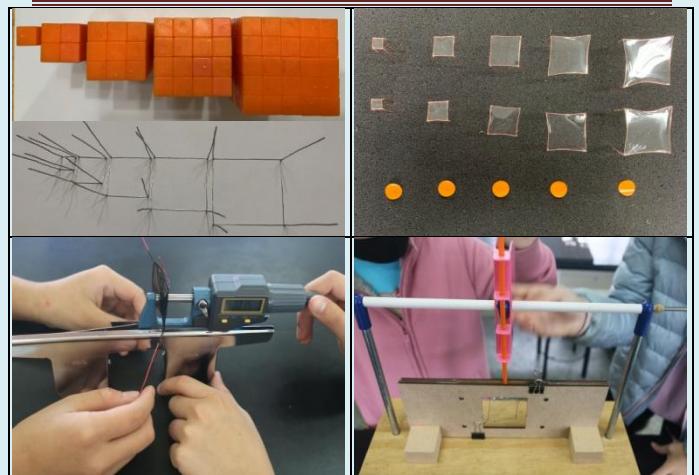


2. 抗穿刺強度的分級

級數	1 級	2 級	3 級	4 級	5 級	6 級	7 級	8 級
擺錘狀態	長度 15cm				長度 20cm			
	角度 45°	角度 90°	角度 135°	角度 180°	角度 45°	角度 90°	角度 135°	角度 180°

研究問題三：

不同線圈面積對水晶膠最小能量成膜的影響



- 面積愈大的線圈，愈難沾取膠液，變形的程度較大。
- 面積愈小的膜面，中心厚度會較厚，抗穿刺強度愈強。

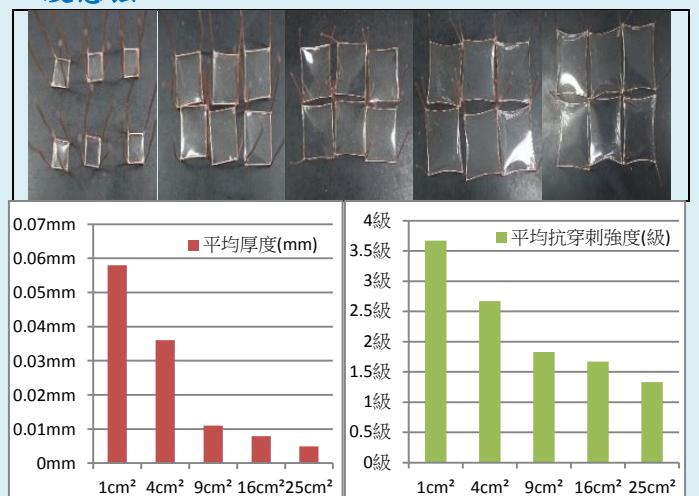


圖 1 不同面積膜面厚度比較

圖 2 不同面積膜面抗穿刺強度比較

研究問題四：

不同銅線粗細對水晶膠最小能量成膜的影響

- 銅線直徑較細的線圈，變形較嚴重。
- 銅線直徑較粗的線圈(0.7mm、0.8mm、1.0mm)，膜面易破裂。
- 銅線愈粗的線圈膜面，厚度愈厚，抗穿刺強度愈強。

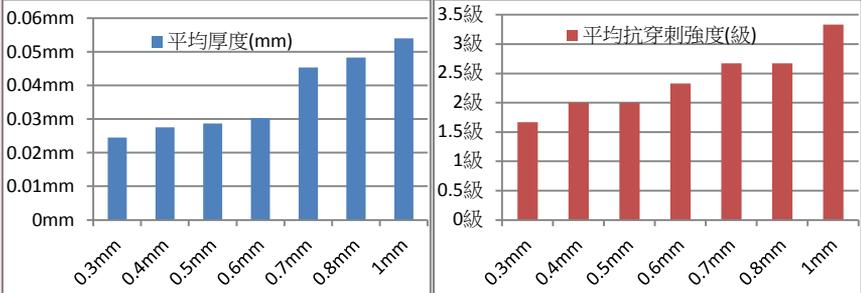
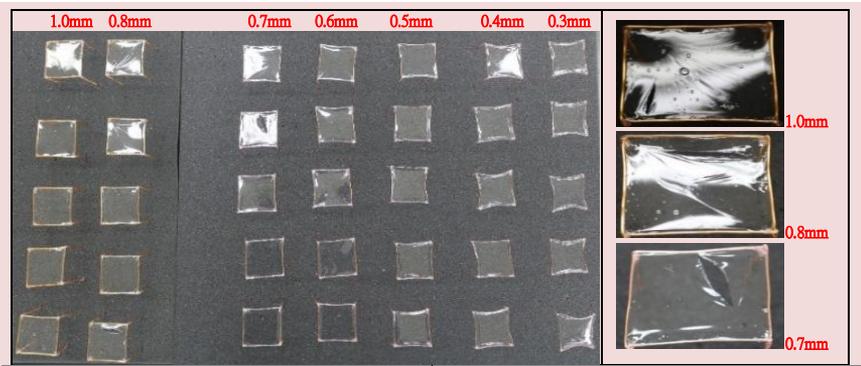


圖 3 不同粗細銅線之膜面厚度比較 圖 4 不同粗細銅線之膜面穿刺強度比較

研究問題五：

不同支架數量對水晶膠最小能量成膜的影響

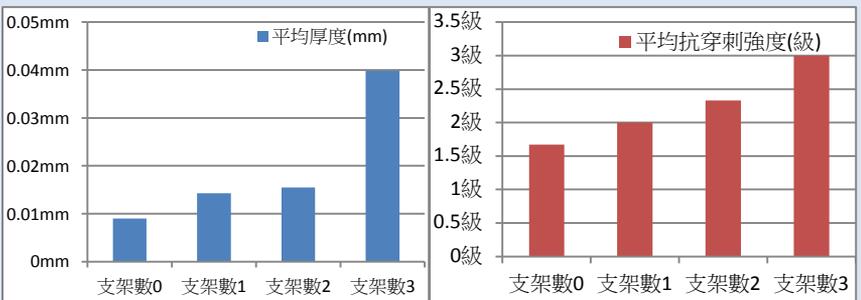
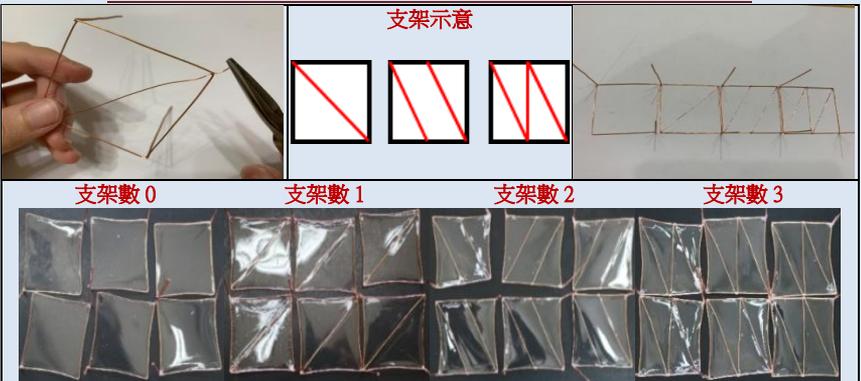


圖 5 不同支架數量之膜面厚度比較 圖 6 不同支架數量之膜面抗穿刺強度比較

1. 支架數量較多的膜面(支架數 2、3)，較不易乾燥後破裂。
2. 支架愈多的膜面，厚度愈厚，抗穿刺強度愈強。

研究問題六：

不同線圈夾角對水晶膠最小能量成膜的影響

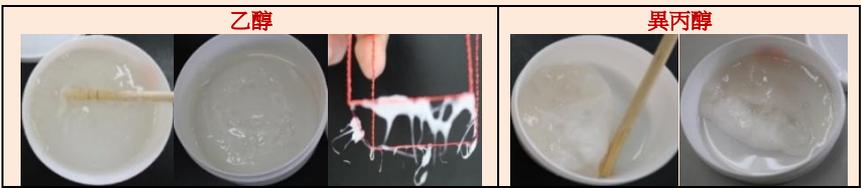


1. 夾角 $\geq 90^\circ$ 的雙線圈才能形成兩個各自完整的膜面。
2. 夾角 $< 90^\circ$ 的線圈無法成兩個各自完整的膜面，表面張力會以最小能量成膜，兩個圓膜面底部會合併成一片。

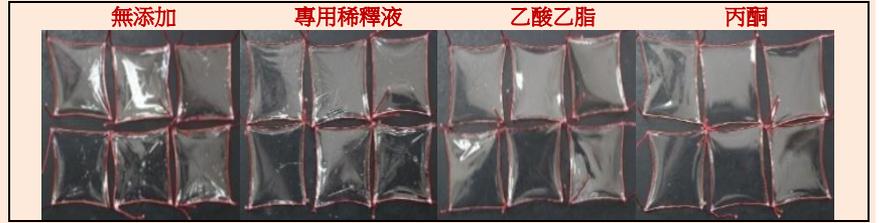
研究問題七：

不同稀釋液對水晶膠最小能量成膜的影響

1. 本實驗之水晶膠不可用乙醇與異丙醇來稀釋，會使膠液成坨和變白。



2. 本實驗所用之水晶膠可使用專用稀釋液、乙酸乙脂、丙酮三種溶劑來當做稀釋液加以稀釋，膜面氣泡數量少。



3. 乙酸乙脂是較理想的稀釋液。價格便宜，膜面氣泡數量最少，調好的膠液半小時後就能用，一天後的抗穿刺強度也較強。
4. 添加較少乙酸乙脂的膠液，所形成的膜面厚度愈厚，抗穿刺強度愈強。

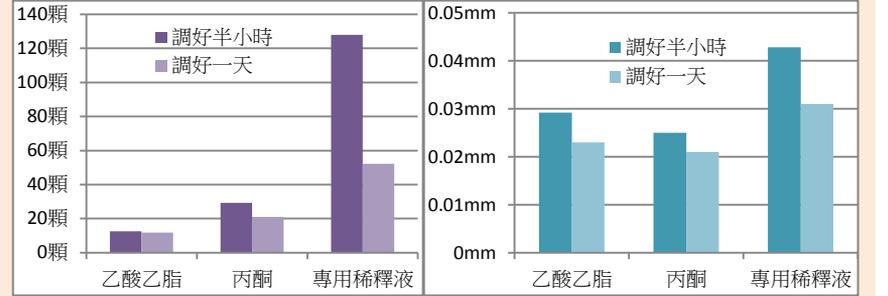


圖 7 不同稀釋液之膜面氣泡數比較 圖 8 不同種類稀釋液之膜面厚度比較

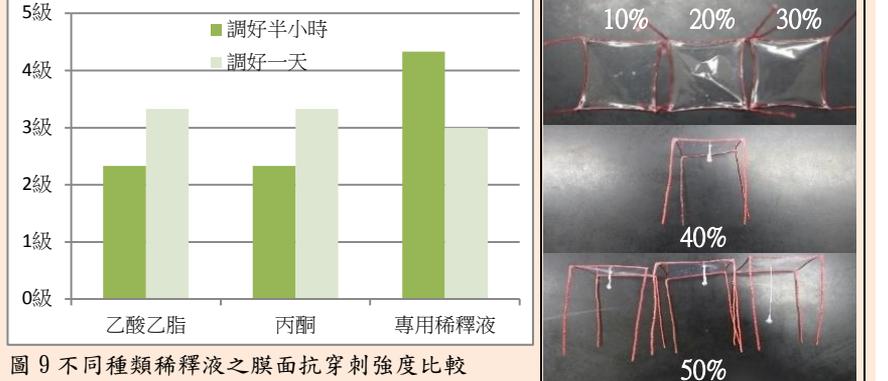


圖 9 不同種類稀釋液之膜面抗穿刺強度比較 圖 10 不同比例稀釋液膜面厚度比較 圖 11 不同比例稀釋液膜面抗穿刺強度比較

5. 添加乙酸乙脂 30% 的膠液，所形成的膜面最漂亮。不只膜面氣泡數量最少，無白霧現象，也不會在靜置過程中滴落。

研究問題八：

重瓣花的製作方法—最小能量花

1. 不同線圈纏繞方式的製作比較

	單圈單節點	多圈多節點	多圈單節點
纏繞方式			
成品			
適用	1. 沒有限制。 ★★★★	1. 非中心的花瓣。 ★★★	1. 單層花。 ★★ 2. 中心花瓣。 ★
重量	沾膠前線圈重 1.47g 組合完成重量 1.99g 重量最重★	沾膠前線圈重 0.96g 組合完成重量 1.31g 重量中等★★★	沾膠前線圈重 0.87g 組合完成重量 1.26g 重量最輕★★★★
操作	最簡易 ★★★★	中等 ★★	最難線圈需扭轉後組合★

2. 多圈單節點花瓣塑成菱形，加入對稱概念，可解決花瓣重疊問題，但每層的花瓣數需 > 3 片。



3. 多圈單節點花瓣塑成梭形，用添加 30% 乙酸乙酯的水晶膠能縮小線圈間夾角，順利塑形組合。



4. 運用單圈單節點的做法，結合研究五的實驗結果，做成聖誕紅吊飾。



5. 結合單圈單節點與多圈單節點的方法，組成三色堇。



研究問題九：

立體型體的直接沾取—造成最小能量成膜

1. 平面圖形彎曲或扭轉形成的立體形體線圈用直接沾取法形成的最小面積膜面就是所需要的膜面（如彎曲花瓣、蝴蝶結與扇貝殼）。



2. 直接沾取法無法製作出完整的球形膜面。
3. 直接沾取法會使錐體與柱體形成最小面積膜面，而不會在表面形成膜面。在這些錐體或柱體的內部，形成由每個邊向內部中心交集的膜面，交集出一條線或一個平面。



4. 側面有支架的柱體，使用直接沾取法，會形成非封閉的最小面積膜面。頂面的膠液會因重力下拉，使其附著在側面四個垂直面的支架上。

研究問題十：

立體型體的間接沾取—克服最小能量成膜



1. 只往不返的間接沾取法可成功克服最小能量成膜，在多面封閉立體形體上形成表面膜面。



2. 雙球體的中間內縮部位無法完全克服最小能量成膜的影響。雙球體間的膜面無法包圍在內凹的銅線上。



3. 結合球體與單圈單節點製作萬聖節南瓜。



4. 結合立體與多圈單節點模仿香椿果實。



結論

一、影響水晶膠最小能量成膜狀態的因素：
水晶膠最小能量膜面的厚度與抗穿刺強度成正相關。過程中，選用愈粗的銅線，製作較小的面積、較多的支架的線圈，可獲得較厚且抗穿刺強度較強的膜面。

若是多花瓣線圈同時沾膠，則需把夾角打開成 $\geq 90^\circ$ 的花瓣間才不會沾黏。



在膠液中加入 30% 乙酸乙酯稀釋並靜置超過半小時，可輕鬆沾膠並做出氣泡數量少的膜面。

二、使用水晶膠造花液的最佳操作方法：
(一) 直接沾取：平面、單面立體、多面非封閉立體線圈都能形成最小能量膜面。
(二) 間接沾取：多面封閉立體線圈在表面成膜需克服最小能量成膜。必須另外用較粗的金屬線，製作較大面積的線圈，先沾取膠液成膜後，再將金屬線圈上已形成的膜面包覆到立體形體上，才能成功。

討論與建議

一、表面張力最小面積成膜是成功關鍵：
製作水晶膠花需事先從表面張力形成的最小面積來思考，選擇不同的膠液沾取法，才能成功得到所需要的膜面。
二、成功自行研發膜面特殊檢測工具：
從最耐重度轉變到抗穿刺強度，不斷改良工具與線圈才完成確定版的膜面檢測工具。
三、手作纏繞銅線線圈是耐心挑戰：
運用古氏積木與圓形管束，在相同長度的銅線上扭轉相同的圈數，製作出一致的線圈。

參考資料

- 李彥霆、林冠豪、陳立珩 (2016)。泡泡面面觀。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 周昕諭 (2016)。正多面體之皂膜最小表面能之探討。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 林品汝、倪羽薇、王釋玄 (2015)。「癩室」了得，硬是了得！探討檸檬壯缺普癩的生態及生物防治可行性。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 黃翊瑄、張至騫、藍以丞、洪御翔、陳亦敬、楊博翰 (2018)。渾身解塑—以回收紙漿和洋菜製作可分解垃圾袋。臺北：國立臺灣科學教育館。
- 劉權毅醫師部落格 (2012)。如何看懂指甲油成分。取自 <https://yanjiskin.pixnet.net/blog/post/229205501>
- 每日頭條 (2018)。GB/T10004 標準關於包裝塑料複合膜穿刺強度測試方法。取自 <https://kknews.cc/zh-tw/news/xp8zep8.html>